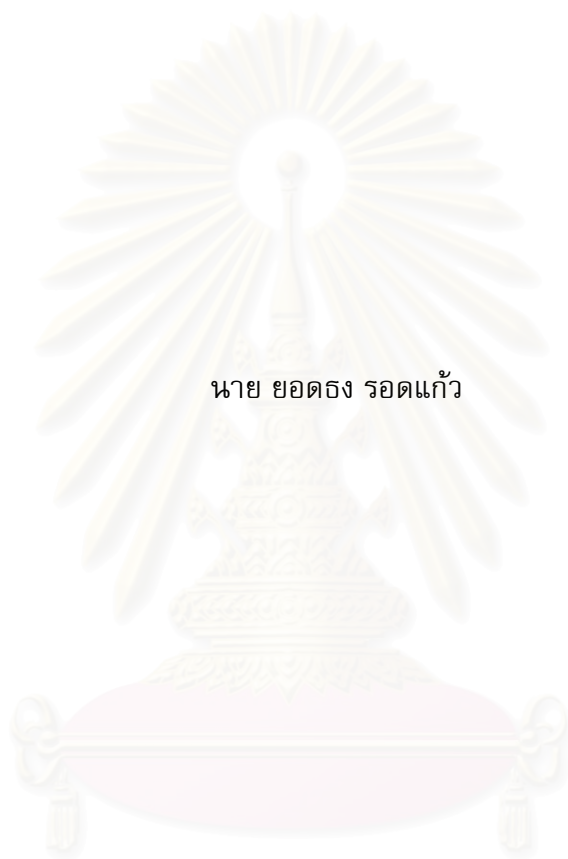


ขั้นตอนวิธีสำหรับสร้างแบบจำลองพีช



นาย ยอดธง รอดแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

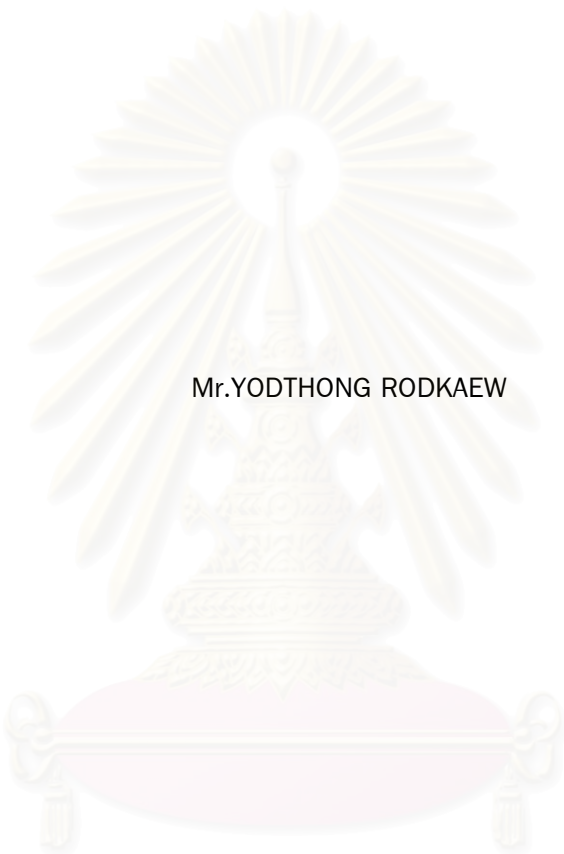
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4624-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AN ALGORITHM FOR GENERATING PLANT MODEL



Mr.YODTHONG RODKAEW

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy in Computer Engineering

Department of Computer Engineering
Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2003

ISBN 974-17-4624-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ขั้นตอนวิธีสำหรับสร้างแบบจำลองพีช
โดย	ยอดธง รอดแก้ว
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.สุชาดา ศิริพันธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์
ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ชิตชนก เหลือสินทรัพย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ สุชาดา ศิริพันธ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จำนงไทย)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชุมพล คุณวาสี)

ยอดธง รอดแก้ว : ขั้นตอนวิธีสำหรับสร้างแบบจำลองพืช. (AN ALGORITHM FOR GENERATING PLANT MODEL) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา, อ. ที่ปรึกษาร่วม : รศ.สุชาติ ศิริพันธุ์, 142 หน้า. ISBN 974-17-4624-5.

วิทยานิพนธ์นี้อธิบายขั้นตอนวิธีสำหรับสร้างแบบจำลองพืชโดยใช้ระบบขนส่งอนุภาค ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอได้รับแรงบันดาลใจมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของธรรมชาติ โครงสร้างเส้นใบถูกใช้จำลองสารอาหารที่สังเคราะห์ได้จากดวงอาทิตย์ไปยังก้านใบสู่ทุกๆ ส่วนของพืช ขั้นตอนนี้ถูกจำลองโดยใช้เส้นทางของอนุภาคที่มีปฏิสัมพันธ์กันภายใต้กฎทางกายภาพอย่างง่าย ขั้นตอนวิธีนี้สร้างโครงสร้างเส้นใบในหลายรูปแบบ และยังสามารถสร้างโครงสร้างต้นไม้จากรูปทรงที่กำหนด เมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่น ระบบขนส่งอนุภาคมีข้อได้เปรียบหลายอย่าง โครงสร้างสามารถสร้างจากขอบเขตรูปทรง ใช้กฎทางกายภาพอย่างง่ายและพารามิเตอร์จำนวนน้อย โครงสร้างพืชหลายชนิดสามารถสร้างขึ้นได้โดยอัตโนมัติและผลลัพธ์มีความสมจริง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4371813021 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEY WORD: PLANT MODELING / LEAF MODELING / VENETION STRUCTURE / PARTICLE SYSTEMS /
PARTICLE TRANSPORTATION SYSTEM / L-SYSTEMS / GENETIC ALGORITHMS

YODTHONG RODKAEW : AN ALGORITHM FOR GENERATING PLANT MODEL THESIS ADVISOR :
Assoc. PRABHAS CHONGSTITVATANA, Ph.D., THESIS COADVISOR : Assoc. SUCHADA SIRIPANT,
142 pp. ISBN 974-17-4624-5.

This thesis describes an algorithm for generating plant models using Particle Transportation System. The proposed algorithm is inspired by the photosynthesis process of nature. The leaf venetion structure is used to transport nutrient that is synthesised from the sun through the petiole outwards to all parts of a plant. This process is emulated using the trace of particles interacting under a simple physical law. This algorithm creates the leaf venetion structure in many forms. It is also able to create a tree structure from a specific shape. Compare to other systems, the Particle Transportation System's advantages are numerous. The stucture can be created from the shape boundary. A simple physical law with a small number of parameters is used. Many plant structures can be generated automatically and the results are realistic.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department COMPUTER ENGINEERING
Field of COMPUTER ENGINEERING
Academic Year 2003

Student's signature
Advisor's signature
CoAdvisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จากความช่วยเหลือของบุคคลหลายท่านที่คอยให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น การแก้ไขปัญหาต่างๆ และกำลังใจด้วยดีตลอดมา ดังนี้ รศ.ดร. ประภาส จงสถิตย์วัฒนา (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์), รศ.สุชาดา ศิริพันธุ์ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม), ศ.ดร.ชิตชนกเหลือสินทรัพย์ (AVIC, จุฬาฯ), ผศ.ดร.ศุภจิตรา ชัชวาลย์ (พฤกษศาสตร์จุฬาฯ), อ.ดร.ชุมพล คุณวาสี (พฤกษศาสตร์จุฬาฯ หนังสือเกี่ยวกับต้นไม้และใบไม้), Prof.Dr.Norishige Chiba (IWATE U. หนังสือเกี่ยวกับใบไม้และใบไม้ พาชมต้นไม้ที่ MORIOKA Prefecture.), Dr.Tadahiro Fujimoto (IWATE U. พาชมต้นไม้ที่ MORIOKA Prefecture), Mr.Norihiro Nasukawa (IWATE University. หนังสือเกี่ยวกับใบไม้), Mr.Itou และ Mr.Miyauchi (พาชมสวนพฤกษศาสตร์ที่ IWATE University.), Olarn (จำแนกลักษณะใบไม้ตาม MLA), เพื่อนๆ และผู้เขียนหนังสือและตำราเกี่ยวกับพืช ต้นไม้ แบบจำลองทางธรรมชาติแบบต่างๆ รวมถึงธรรมะและวาตะของนักคิดและนักปราชญ์อีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาซึ่งสนับสนุนในทุกๆ ด้านและผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา และด้วยความช่วยเหลือที่ดีของน้องในช่วงเวลาเร่งรีบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ด
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 เนื้อหาในวิทยานิพนธ์นี้.....	4
1.7 งานตีพิมพ์.....	4
บทที่ 2.....	6
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 แบบจำลองเน้นโครงสร้าง.....	7
2.1.1 Predefined surface.....	7
2.1.2 แบบจำลองพีชโดยรูปแบบโครงสร้างทางพฤกษศาสตร์.....	8
2.1.3 แบบจำลองพีชจากการวัดและคณิตศาสตร์.....	13
2.1.4 Fractals.....	16
2.1.5 L-systems.....	17
2.1.5.1 DOL-systems.....	18
2.1.5.2 Parametric OL-systems.....	18
2.1.5.3 Turtle Graphics.....	18
2.1.5.4 การสร้างใบไม้ด้วย L-systems แบบใบเดี่ยว.....	19
2.1.5.5 การสร้างใบไม้ด้วย L-systems แบบใบประกอบ.....	19
2.1.5.6 L-systems และ Predefined Surface.....	21
2.1.5.7 L-systems และ Compound Leaves ด้วย Implicit contours.....	21
2.1.5.8 L-systems และการตัดแต่งทรงพุ่ม (Synthetic Topiary).....	23
2.1.5.9 L-systems และการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อม.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.5.10 L-systems และการใช้ข้อมูลบอกตำแหน่งสำหรับสร้างแบบจำลองพืช	26
2.1.5.11 การเพิ่มความสมจริงของพื้นผิวของแบบจำลองต้นไม้	27
2.2 แบบจำลองเน้นพื้นที่	28
2.2.1 Reaction-Diffusion pattern models	28
2.2.2 Diffusion-Limited accretive growth	28
2.2.3 Meinhardt's Model และ Gottlieb's Model	28
2.2.4 Cellular Automata	29
2.2.5 Voxel-Space Automata	29
2.2.6 Medial-Axis	30
2.3 แบบจำลองพืชแบบอื่นๆ	31
2.3.1 Particle Systems	31
2.3.2 Origami	32
2.3.3 แบบจำลองพืชทางพฤกษศาสตร์	32
2.3.3.1 ฮอร์โมนพืช	32
2.3.3.2 สีของใบไม้และการจัดเรียงของใบไม้	33
2.3.3.3 การเรียงใบ (Phyllotaxis)	33
2.4 สรุป	42
บทที่ 3	44
พืช	44
3.1 ส่วนประกอบของพืช	44
3.2 โครงสร้างของพืช	44
3.2.1 ลักษณะโครงสร้างของพืชใบเลี้ยงคู่และพืชใบเลี้ยงเดี่ยว	45
3.3 ใบไม้	48
3.3.1 ใบเลี้ยง (Cotyledon)	48
3.3.2 ใบเกล็ด (Scale Leaf)	48
3.3.3 ใบดอก (Floral Leaf)	48
3.3.4 ใบแท้ (Foliage Leaf)	48
3.4 ส่วนประกอบของใบ	48
3.4.1 แผ่นใบ (Blade)	49
3.4.2 ก้านใบ (Petiole)	49
3.4.3 หูใบ (Stipule)	49
3.5 โครงสร้างภายในของใบ	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.1 เอพิตเดอริมีส (Epidermis)	50
3.5.2 มีโซฟิลล์ (Meshphyll).....	50
3.5.3 กลุ่มท่อลำเลียง (Vascular Tissue)	51
3.6 ชนิดของใบแท้.....	51
3.7 รูปร่างของใบ.....	54
3.8 สรุปรูป	58
บทที่ 4.....	59
การสร้างแบบจำลองใบไม้ด้วย L-systems และ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	59
4.1 ปัญหาการควบคุมพารามิเตอร์.....	62
4.2 Tag Functions	65
4.2.1 ประโยชน์ของ Tag Functions	68
4.2.2 ประเภทของ Tag Functions	68
4.2.2.1 m-Type.....	68
4.2.2.2 n-Type.....	69
4.3 โครงสร้างแกนใบไม้.....	70
4.4 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	72
4.5 การทดลอง	74
4.5.1 Genetic Parameters	74
4.5.2 Fitness Function.....	74
4.6 ผลการทดลอง.....	77
4.7 สรุปรูป	80
บทที่ 5.....	81
การสร้างแบบจำลองใบไม้ด้วยระบบขนส่งอนุภาค	81
5.1 รูปแบบโครงสร้างของเส้นใบ.....	82
5.2 การเคลื่อนที่แบบย้อนกลับ	83
5.3 การขนส่งอนุภาค.....	84
5.3.1 แนวความคิดของขั้นตอนวิธีขนส่งอนุภาค แบบที่ 1	85
5.3.2 แนวความคิดของขั้นตอนวิธีขนส่งอนุภาค แบบที่ 2.....	86
5.3.3 ขั้นตอนวิธีขนส่งอนุภาค	87
5.3.4 การคำนวณในขั้นตอนวิธีขนส่งอนุภาค	88
5.3.4.1 ทิศทางการเคลื่อนที่.....	88
5.3.4.2 การเคลื่อนที่	90
5.3.4.3 การรวมอนุภาค.....	90

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4 รูปร่างของขอบใบ	91
5.4.1 จากภาพใบไม้จริง.....	91
5.4.2 จากการสังเคราะห์.....	92
5.5 การจัดวางอนุภาค	96
5.5.1 รูปแบบการจัดเรียงอนุภาคภายในพื้นที่ที่กำหนด	96
5.5.2 ความหนาแน่นของอนุภาค.....	97
5.6 การสร้างเส้นใบไม้ด้วยระบบขนส่งอนุภาค	97
5.7 การปรับปรุงผลลัพธ์	98
5.8 พารามิเตอร์.....	99
5.8.1 ลักษณะของเส้นใบที่ได้จากพารามิเตอร์ต่างๆ.....	103
5.8.2 ความสำคัญระหว่างเป้าหมายกับตัวที่ใกล้เคียงที่สุด	103
5.8.3 การจัดวางตำแหน่งบนเส้นขอบใบ	104
5.9 การเปรียบเทียบแบบจำลองกับใบไม้จริง.....	105
5.10 สีและลวดลาย	107
5.11 สรุป.....	110
บทที่ 6.....	111
การสร้างแบบจำลองพืชด้วยระบบขนส่งอนุภาค.....	111
6.1 การนำระบบขนส่งอนุภาคมาใช้ในการสร้างแบบจำลองพืช.....	111
6.2 การปรับปรุงขั้นตอนวิธีระบบขนส่งอนุภาค	112
6.3 ความหนาของลำต้นและกิ่งไม้	114
6.4 ความโค้งของกิ่งไม้.....	115
6.5 รูปร่างและขอบเขตสามมิติ	116
6.5.1 การทดสอบจุดภายในขอบเขต	116
6.6 แสงและความหนาแน่นของจุด.....	117
6.7 แบบจำลองที่ตอบสนองต่อสภาพแวดล้อม.....	119
6.7.1 ศิลปะการตัดแต่งรูปทรงพุ่มไม้ (Topiary Modeling).....	120
6.8 การวัดความเร็วในการสร้างภาพ.....	123
6.9 การสร้างแบบจำลองต้นไม้เลียนแบบจากต้นไม้จริง	126
6.10 สรุป.....	128
บทที่ 7.....	129
สรุป.....	129
7.1 งานวิจัยนี้ได้นำเสนอสิ่งใหม่ดังนี้	129
7.1.1 Tag-Functions.....	129

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.1.2 ระบบขนส่งอนุภาค.....	130
7.2 สรุป	132
7.3 ข้อเสนอแนะและปัญหาทั่วไป.....	132
รายการอ้างอิง	133
ภาคผนวก.....	138
ก. ภาพสร้างจากระบบขนส่งอนุภาค.....	139
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	142



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 ใบไม้สร้างจาก bicubic patches.....	7
รูปที่ 2 ภาพใบไม้จริงแบ่งออกเป็นสามส่วน (ซ้าย) การจัดวางของกลุ่มใบไม้ (ขวา)	8
รูปที่ 3 กิ่งไม้และใบไม้ (ซ้าย) ต้น Maple (ขวา)	8
รูปที่ 4 กิ่งไม้	9
รูปที่ 5 ลักษณะการจัดเรียงของใบ	9
รูปที่ 6 ลักษณะการแตกกิ่งก้าน (I) Continuous (II) Rhythmic	9
รูปที่ 7 การงอกใหม่เมื่อถูกตัด	9
รูปที่ 8 รูปแบบของทรงพุ่มหรือเรื้อนยอดของ Corner, Leeuwenberg, Massart และ Rauh... 10	
รูปที่ 9 ตัวอย่างแบบจำลองการเติบโต ลักษณะที่ 0.....	11
รูปที่ 10 ตัวอย่างแบบจำลองการเติบโต ลักษณะที่ 1	11
รูปที่ 11 ตัวอย่างแบบจำลองการเติบโต ลักษณะที่ 2	11
รูปที่ 12 ตัวอย่างแบบจำลองการเติบโต ลักษณะที่ 3	11
รูปที่ 13 อัตราการเติบโตที่แตกต่างกัน.....	11
รูปที่ 14 ลักษณะการแตกกิ่ง.....	11
รูปที่ 15 โครงสร้างสี่ส่วนสำหรับสร้างต้นปาล์ม.....	13
รูปที่ 16 ต้นไม้แบบต่างๆ.....	13
รูปที่ 17 แผนภาพโครงสร้างต้นไม้	15
รูปที่ 18 ต้นไม้จากงานของ J. Weber and J.Penn 1995	16
รูปที่ 19 ใบไม้สร้างด้วย Fractal (Penter E. Oppenheimer 1986).....	16
รูปที่ 20 การวนซ้ำใน L-systems	17
รูปที่ 21 ต้นไม้ใน L-systems	17
รูปที่ 22 ใบไม้แบบใบเดี่ยวสร้างจาก L-systems.....	19
รูปที่ 23 ใบไม้แบบใบประกอบสร้างจาก L-systems	20
รูปที่ 24 แบบจำลองกลีบดอกไม้.....	21
รูปที่ 25 แบบจำลองขอบใบไม้ด้วย L-systems.....	21
รูปที่ 26 ใบไม้แบบใบประกอบสร้างจาก L-systems และ implicit contours.....	21
รูปที่ 27 แผนภาพความสูงจาก implicit contours	21
รูปที่ 28 Field Function $F(d)$ and Derivative $F'(d)$	23
รูปที่ 29 เส้น Implicit countour รอบเส้นตรง AB และจุด ทดสอบ P_1, P_2, P_3	23
รูปที่ 30 ศิลปการตัดแต่งกิ่งด้วย L-system.....	24
รูปที่ 31 แบบจำลองของระบบราก	25

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 32 แบบจำลองของต้นไม้เมื่อมีการแข่งขันเพื่อรับแสง ด้านบนแสดงแบบจำลองที่แยกจากกัน ด้านล่างแสดงแบบจำลองในตำแหน่งปกติ (a) Deciduous Tree (b) Coniferous Tree	25
รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ของทรงพุ่มของต้นไม้และตำแหน่งของต้นไม้	26
รูปที่ 34 ข้อมูลตำแหน่งสำหรับแบบจำลองของใบ <i>Pellaea falcata</i> (sickle fern)	26
รูปที่ 35 ต้นไม้ปกติ	27
รูปที่ 36 ต้นไม้เพิ่มความบิดเบี้ยวของพื้นผิว	27
รูปที่ 37 ต้นไม้เพิ่มความบิดเบี้ยวของพื้นผิวและโครงสร้างหลัก	27
รูปที่ 38 แบบจำลองของ Meinhardt	28
รูปที่ 39 แบบจำลองของ Gottlieb	28
รูปที่ 40 แบบจำลองพีชจาก Volxe-Space Automata	29
รูปที่ 41 แบบจำลองพีชจาก Volxe-Space Automata	29
รูปที่ 42 ภาพต้นไม้สร้างจากภาพถ่ายหลายมุมมอง	30
รูปที่ 43 การระเบิด (ซ้าย) กำแพงไฟ (กลาง) ดอกไม้ไฟ (ขวา)	31
รูปที่ 44 ทิศทางและมุมของ Particle (ซ้าย) ต้นหญ้าจาก Particle Systems (ขวา)	32
รูปที่ 45 ใบไม้แบบพับกระดาษ	32
รูปที่ 46 อัตราส่วนตัวเลขในลำดับฟีโบนัชชี	35
รูปที่ 47 แผนภาพอัตราส่วน ϕ	35
รูปที่ 48 ภาพตัดขวางรูปเวียนของโคน (cone) ของ <i>Pinus pinea</i> (ปสน) Fibonacci Angle (ล่าง)	37
รูปที่ 49 การจัดเรียงใบไม้รูปเวียน	38
รูปที่ 50 การจัดเรียงใบไม้รูปเวียน	39
รูปที่ 51 ภาพถ่ายของ <i>Microseris pygmaea</i> ตัวเลขแสดงลำดับการเกิดของ primordia และแถบแสดงระยะ 50 μ m	40
รูปที่ 52 แบบจำลองการจัดเรียงตำแหน่งรูปเวียน (ซ้าย) ตำแหน่งถูกจัดวางตามลำดับ ด้วยค่ามุม 137.5 และจัดให้อยู่ในตำแหน่ง กรณีที่วางไม่ได้ตำแหน่งจะเลื่อนขึ้นตามเส้นโค้ง (ขวา) เพื่อให้ซ้อนทับกันพอดี ในภาพแสดงตำแหน่งที่ 9 กับตำแหน่งที่ 1	40
รูปที่ 53 Green cornflower (ซ้าย) Daisies and chrysanthemums (กลาง) กระบองเพชร <i>Mammillaria spinosissima</i> (ขวา)	42
รูปที่ 54 Raspberry-O's (ซ้าย) cauliflowers & broccolis (กลาง) ดอกไม้ในกระถาง (ขวา) ..	42
รูปที่ 55 ผังส่วนต่างๆ ของพืชดอก	45
รูปที่ 56 ลักษณะของพืชใบเลี้ยงคู่ (ซ้าย) และใบเลี้ยงเดี่ยว (ขวา)	46
รูปที่ 57 การจัดระเบียบของเส้นใบ	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 58 ลักษณะเส้นใบ (แฉกบน) และเส้นใบภายในช่องร่างแห (aereole) (แฉกล่าง).....	47
รูปที่ 59 การจัดระเบียบของเส้นใบ.....	47
รูปที่ 60 ส่วนประกอบของใบ.....	49
รูปที่ 61 ภาคตัดขวางของใบ.....	50
รูปที่ 62 ใบเดี่ยว.....	52
รูปที่ 63 ใบประกอบ.....	52
รูปที่ 64 ใบประกอบแบบขนนก.....	53
รูปที่ 65 ลักษณะรูปใบ.....	54
รูปที่ 66 ลักษณะปลายใบ.....	55
รูปที่ 67 ลักษณะโคนใบ.....	56
รูปที่ 68 ลักษณะของขอบใบแบบต่างๆ.....	57
รูปที่ 69 รูปร่างของแผ่นใบแบบต่างๆ.....	57
รูปที่ 70 โครงสร้างใบไม้ แสดงกิ่งและก้าน (a) เมื่อกำหนดให้ $d_i=0$ สำหรับ i ทั้งหมด (b) เมื่อกำหนด $d_i=0$ สำหรับ $i>1$ และปรับมุมระหว่างก้าน.....	60
รูปที่ 71 โครงสร้างใบไม้ และกฎแบบจำลองใบไม้รวม.....	61
รูปที่ 72 เส้นโค้งสร้างด้วย Parametric L-systems.....	62
รูปที่ 73 Tag function.....	65
รูปที่ 74 เส้นโค้งควบคุมด้วย tag function.....	67
รูปที่ 75 เส้นโค้งควบคุมด้วย tag function 2 ฟังก์ชันพร้อมกัน.....	68
รูปที่ 76 โครงสร้างใบไม้ ใช้กฎ L-systems เดียวกัน ปรับพารามิเตอร์ต่างๆ กัน.....	70
รูปที่ 77 ใบต้นยางพารา(a) และเส้นขอบใบ(b).....	70
รูปที่ 78 กฎสำหรับสร้างใบไม้.....	71
รูปที่ 79 กฎสำหรับสร้างใบไม้ในรูป tag function.....	71
รูปที่ 80 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	73
รูปที่ 81 การเข้ารหัส tag function สำหรับการทดลอง.....	74
รูปที่ 82 การหาเส้นขอบของภาพ.....	76
รูปที่ 83 ภาพเป้าหมายที่ต้องการเปรียบเทียบ (ซ้าย) การเปรียบเทียบต้นฉบับและภาพเป้าหมาย (ขวา).....	76
รูปที่ 84 ตัวอย่างประชากรรุ่นแรก.....	78
รูปที่ 85 ประชากรตัวที่ดีที่สุดในเรื่องที่ 1.....	78
รูปที่ 86 ประชากรตัวที่ดีที่สุดในเรื่องที่ 200.....	79
รูปที่ 87 แบบจำลองใบไม้ปรับพารามิเตอร์ด้วยขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม.....	79
รูปที่ 88 การขยายขนาดของใบไม้.....	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 89 ปัญหาการเคลื่อนที่ของอนุภาค (a) ออกจากเป้าหมายและ (b) กลับไปสู่เป้าหมาย	83
รูปที่ 90 แบบจำลองใบไม้สำหรับการขนส่งพลังงาน.....	85
รูปที่ 91 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค	88
รูปที่ 92 รูปใบไม้จาก Spline Curve (จุดในภาพคือ Control Points).....	92
รูปที่ 93 รูปร่างของใบไม้แบบต่างๆ สร้างด้วย Spline Curve.....	94
รูปที่ 94 การปรับพารามิเตอร์ของเส้นขอบบนเส้นตรง.....	95
รูปที่ 95 การปรับพารามิเตอร์ของเส้นขอบบน Spline Curve	95
รูปที่ 96 ภาพใบไม้และเส้นขอบแบบต่างๆ แบบเส้นตรงปกติ (a) แบบโค้งเข้า (b) ฟันเลื่อย สามเหลี่ยม (c) แบบโค้งเข้า (d)	96
รูปที่ 97 ลักษณะการจัดวางจุดแบบต่างๆ.....	97
รูปที่ 98 การจัดวางจุดแบบตารางสี่เหลี่ยม (a) จุดที่ภายในเส้นขอบใบ (b)	97
รูปที่ 99 การสร้างเส้นใบด้วยระบบขนส่งอนุภาค	98
รูปที่ 100 การสร้างเส้นใบด้วยระบบขนส่งอนุภาค.....	98
รูปที่ 101 การปรับปรุงภาพเส้นใบ.....	99
รูปที่ 102 ผลกระทบจากการปรับค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างเป้าหมายและตัวที่ใกล้ (ใช้ 1,200 อนุภาค จัดเรียงแบบ square).....	104
รูปที่ 103 ผลจากการจัดวางตำแหน่งบนเส้นขอบใบ	104
รูปที่ 104 ใบไม้จริง (ซ้าย) เปรียบเทียบกับแบบจำลองใบไม้ (กลางและขวา).....	106
รูปที่ 105 โครงสร้างเส้นใบ (ซ้าย) และแผนที่เส้นแรง (ขวา).....	107
รูปที่ 106 การเคลื่อนที่ของกลุ่มสีตามทิศทางของแรง.....	108
รูปที่ 107 การเคลื่อนที่ของกลุ่มสีตามทิศทางของแรง.....	108
รูปที่ 108 ภาพใบพลูต่างจากแบบจำลองการเคลื่อนที่ของสี.....	109
รูปที่ 109 แบบจำลองพลูต่าง (<i>Scindapsus aureus</i>)	109
รูปที่ 110 แบบจำลองสามมิติของระบบขนส่งอนุภาค	112
รูปที่ 111 แบบจำลองต้นไม้และระบบราก	113
รูปที่ 112 อัตราส่วนความหนาที่แตกต่างกัน 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0 และ 3.0 (จากซ้ายไปขวาและบนลงล่าง).....	115
รูปที่ 113 ความโค้งของกิ่ง เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (ซ้าย) เส้นทางการเชื่อมต่อของ อนุภาค (ขวา).....	115
รูปที่ 114 ตัวอย่างส่วนตัดขวาง (ซ้าย) ส่วนตัดขวางทั้งหมดของการทดสอบ (ซ้ายกลาง) ภายหลังจากการทดสอบ ตำแหน่งจุดทั้งหมดที่อยู่ภายในขอบเขต สร้างเป็นต้นไม้ (ขวา กลาง และขวา).....	116

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 115 ต้นไม้ที่เกิดจากตำแหน่งของอนุภาคระหว่าง ขอบเขตภายนอกและ ขอบเขตภายใน ทรงกลม (ซ้าย) และทรงสี่เหลี่ยม (ขวา) มีตำแหน่งของอนุภาค บางส่วนเกินออกมา เนื่องจากการสุ่มเพิ่มเติมภายหลังการทดสอบขอบเขต.....	117
รูปที่ 116 การคำนวณแสงภายในแถวลำดับสามมิติ (ซ้าย) แบบจำลองต้นไม้ที่ขึ้นกับปริมาณ แสงที่ได้รับ (ขวา)	118
รูปที่ 117 การเคลื่อนที่ของอนุภาคบนแบบจำลองที่มีผลจากของปริมาณแสงที่ได้รับ.....	119
รูปที่ 118 ต้นไม้คู่.....	119
รูปที่ 119 ต้นไม้ตัดแต่งเป็นรูปทรงกลม.....	120
รูปที่ 120 ต้นไม้รูปสัตว์.....	120
รูปที่ 121 ต้นไม้สร้างจากรูปทรงเรขาคณิตแบบต่างๆ.....	121
รูปที่ 122 แบบจำลองต้นไม้และอาคาร(แสดงผลกระทบของแสงเงาจากวัตถุอื่นในฉาก)... ..	122
รูปที่ 123 ฉากที่ใช้ทดสอบ ทั้งสี่ฉากประกอบด้วย (a) ต้นไม้ 1 ต้น (b) ต้นไม้ 2 ต้น (c) ต้นไม้รูปสัตว์ และ (d) ต้นไม้ 10 ต้น.....	125
รูปที่ 124 ฉากที่ใช้ทดสอบ ฉากที่ 4 ต้นไม้ 10 ต้น ในมุมมองต่างๆ แสดงโครงสร้างลำต้น (a,c) และ แสดงต้นไม้(b,d).....	126
รูปที่ 125 ภาพถ่ายต้นไม้แบบที่ 1 (a) และ ต้นไม้จากแบบจำลองแบบที่ 1 (b)	127
รูปที่ 126 ภาพถ่ายต้นไม้แบบที่ 2 (a) และ ต้นไม้จากแบบจำลองแบบที่ 2 (b)	127
รูปที่ 127 ปัญหาเส้นตรงที่สั้นที่สุดสำหรับจุด P และ T ในใบไม้จากต้น Paper Mulberry (<i>Broussonetia papyrifera</i>).....	131
รูปที่ 128 แบบจำลองของผีเสื้อสร้างจากระบบขนส่งอนุภาค (ซ้ายและกลาง) ภาพผีเสื้อจริง (ขวา)	132
รูปที่ 129 ภาพสร้างจากระบบขนส่งอนุภาค จำลองฤดูกาลต่างๆ ด้วยการเปลี่ยนภาพพื้นผิว โดยใช้แบบจำลองต้นไม้ ต้นเดียวกัน.....	139
รูปที่ 130 ภาพสร้างจากระบบขนส่งอนุภาค แนวต้นไม้จากมุมมองด้านข้าง (ซ้าย) ต้นไม้สร้างจากรูปทรงสี่เหลี่ยม สามอันประกอบกัน (ขวา).....	139
รูปที่ 131 ภาพสร้างจากระบบขนส่งอนุภาค แสดงโครงสร้างของลำต้นในมุมมองต่างๆ กัน	140
รูปที่ 132 แบบจำลองต้นไม้และใบไม้ ใบไม้และต้นไม้ที่ใช้ระบบขนส่งอนุภาค	140
รูปที่ 133 แบบจำลองต้นไม้และใบไม้ แสดงโครงสร้างของลำต้นในมุมมองต่างๆ กัน.....	140
รูปที่ 134 แบบจำลองใบไม้รูปร่างต่างๆ ใบสร้างจากเส้นโค้ง spline.....	141

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 จำนวนกระต่าย	34
ตาราง 2 แสดงการคำนวณพารามิเตอร์เส้นโค้ง	63
ตาราง 3 แสดงการคำนวณเส้นโค้งโดยใช้ tag function.....	66
ตาราง 4 สัญลักษณ์ tag function และความหมาย	72
ตาราง 5 ใบ IVY และผลของพารามิเตอร์การจัดเรียงแบบต่างๆ	100
ตาราง 6 ใบ PALM และผลของพารามิเตอร์การจัดเรียงแบบต่างๆ	101
ตาราง 7 ใบ SAGITTATE และผลของพารามิเตอร์การจัดเรียงแบบต่างๆ	102
ตาราง 8 เวลาที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสำหรับฉากที่ 1	124
ตาราง 9 เวลาที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสำหรับฉากที่ 2	124
ตาราง 10 เวลาที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสำหรับฉากที่ 3	124
ตาราง 11 เวลาที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสำหรับฉากที่ 4	125



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

The I-Ching dose not offer itself with proofs and results; it dose not vaunt itself, nor is it easy to approach. Like a part of nature, it waits until it is discovered.

--- Carl Jung (from M.S. Schneider 1995:291)

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างแบบจำลองโครงสร้างต้นและเส้นใบของต้นไม้ ในทางพฤกษศาสตร์ โครงสร้างหลักของพืชแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ ราก (root) ลำต้น (stem) และใบ (leaves) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันในเชิงวิวัฒนาการ (วันเพ็ญ ภูติจันทร์ 2540:59) โครงสร้างของพืชนั้นมีความน่าสนใจในการนำมาใช้เป็นตัวอย่งในงานด้านสถาปัตยกรรมโครงสร้าง เส้นใบแข็งแรงซึ่งรับน้ำหนักได้มากของบัววิกตอเรีย (Victoria amazonica) ถูกใช้เป็นพื้นฐานของการออกแบบโครงเหล็กหล่อเพื่อค้ำจุนหลังคากระจกที่เซาท์เวส และคริสตัลพาเลซในกรุงลอนดอน (จารุพันธ์ ทองแถม 2545:442)

สำหรับคอมพิวเตอร์แล้ว การสร้างแบบจำลองของพืชภายในคอมพิวเตอร์นั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความสมจริงของงานทางด้านคอมพิวเตอร์กราฟิก จากความสามารถของอุปกรณ์ช่วยประมวลผลกราฟิกทำให้สามารถแสดงผลแบบจำลองที่มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นได้โดยง่าย ความต้องการแบบจำลองพืชที่มีความสมจริง (realism) และมีรายละเอียดความสมบูรณ์ครบถ้วน (rich detail) ทำให้แบบจำลองมีความซับซ้อนมาก ขั้นตอนวิธีสร้างแบบจำลองพืชที่มีอยู่ในปัจจุบันยังมีข้อจำกัดในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างพืชที่ซับซ้อนเพราะต้องอาศัยการเก็บ

ข้อมูล เช่น การวัด การจดบันทึก และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ การสร้างสมมติฐานหรือสร้างสมการอธิบายโครงสร้างนั้นยังต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญเป็นผู้กำหนด ไม่อาจให้คอมพิวเตอร์สร้างเองได้อย่างอัตโนมัติ การสร้างสมการมีความซับซ้อนภายในสมการประกอบด้วยเส้นโค้งหลายเส้นและแต่ละเส้นซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรต่างๆ พารามิเตอร์จำนวนมาก การค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนั้นเป็นงานที่ใช้เวลา และเมื่อได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมกับการใช้งานของพืชประเภทหนึ่ง ก็ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้กับประเภทอื่น

แบบจำลองพืชเป็นองค์ประกอบหนึ่งซึ่งช่วยเพิ่มความสมบูรณ์และความสมจริงในงานเกือบทุกประเภท เช่น งานคอมพิวเตอร์กราฟิกต้องการแบบจำลองที่สมจริงสำหรับใช้แทนต้นไม้จริง งานออกแบบทางสถาปัตยกรรมต้องการแบบจำลองที่สามารถจำลองสถานการณ์ภายในสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ งานโฆษณาต้องการแบบจำลองที่ดูเกินจริง หรือแบบจำลองที่ไม่อาจเกิดขึ้นจริง งานเสมือนจริงต้องการจำลองสถานการณ์เมื่อเกิดเหตุการณ์ต่างๆ ขึ้น เช่น การแนะนำทางหนีเมื่อเกิดเพลิงไหม้ภายในอาคาร การนำทางในการท่องเที่ยวสถานที่สำคัญ แบบจำลองนี้จะเน้นความสมจริงกับสิ่งที่มีอยู่จริง โดยจำลองแบบจำลองพืชจากพืชจริง เพื่อให้มีลักษณะใกล้เคียงของจริงมากที่สุด ในเกมคอมพิวเตอร์และงานอื่นๆ ส่วนใหญ่ต้องการแบบจำลองที่สามารถปรับจำนวนของข้อมูลสำหรับการแสดงผลได้ ต้องการจำนวนของข้อมูลน้อยๆ หรือ ไม่เก็บตัวข้อมูลไว้เลย แต่จะเก็บพารามิเตอร์บางตัวสำหรับสร้างแบบจำลองเพื่อแสดงผลแบบรวดเร็วได้ แบบจำลองพืชที่ใช้สำหรับการศึกษาพืชโดยเฉพาะการจำลองพันธุ์พืชต่างๆ โดยเฉพาะพันธุ์พืชหายาก เหมาะสำหรับการศึกษา รูปร่าง ลักษณะของพืช จากภาพสามมิติ การสร้างสารานุกรมพืช แสดงพันธุ์พืชหายาก การจำลองการเจริญเติบโตของพืชวิจัศึกษการเจริญเติบโตของลำต้น การแตกใบอ่อน การแผ่ขยายราก การวัดปริมาณแสงที่พืชได้รับ เป็นต้น เมื่อมีแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืชแล้ว สามารถนำมาใช้สำหรับการวิจัยจำลองการปลูกพืชในสภาวะต่างๆ กัน เพื่อการศึกษา โดยอาศัยข้อมูลต่างๆ เช่น คุณภาพของดิน ปริมาณน้ำ แสงสว่าง ความชื้น อุณหภูมิ ทิศทางของแสง เพื่อจำลองและคาดการณ์สถานการณ์ที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต เช่น การปลูกป่าแบบผสม การฟื้นฟูป่า เป็นต้น

การสร้างแบบจำลองมีความเหมาะสมแตกต่างกันตามความต้องการในงานแต่ละประเภท เพื่อให้ครอบคลุมกับการนำแบบจำลองพืชไปใช้งาน ขั้นตอนวิธีสำหรับการสร้างแบบจำลองพืชควรมีคุณสมบัติดังนี้ มีความสมจริง มีการตอบสนองกับสภาพแวดล้อม สร้างแบบจำลองได้รวดเร็ว สร้างแบบจำลองในลักษณะที่คล้ายกันได้ สามารถสร้างแบบจำลองโดยกำหนดขอบเขตรูปร่างได้ ขั้นตอนวิธีสามารถปรับปรุงเพิ่มเติมได้ มีประสิทธิภาพในการใช้งาน ใช้เนื้อที่สำหรับเก็บข้อมูลน้อย ใช้การคำนวณน้อย ควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์จำนวนน้อย มีความง่ายต่อการศึกษา การสร้างโปรแกรม และการนำไปใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อสร้างขั้นตอนวิธีสำหรับสร้างโครงสร้างต้นไม้และใบไม้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

เนื่องจากโครงสร้างของต้นไม้และเส้นใบในธรรมชาติมีรูปร่างหลากหลายลักษณะ จึงเป็นไปได้ยากที่จะสร้างแบบจำลองที่สามารถครอบคลุมได้ครบทั้งหมด ในงานวิจัยนี้จึงมีข้อจำกัดกล่าวคือ

1. วิจัยขั้นตอนวิธีสำหรับสร้างโครงสร้างของต้น กิ่งและใบของต้นไม้ ขั้นตอนวิธีที่ได้สามารถนำมาสร้างโครงสร้างของต้นไม้และเส้นใบไม้บางรูปแบบ ซึ่งไม่ครอบคลุมต้นไม้และใบไม้ครบทุกรูปแบบ

2. ส่วนโครงสร้างของต้นไม้เป็นรูปทรง 3 มิติ สำหรับโครงสร้างของเส้นใบ เป็นรูปทรง 2 มิติ ไม่รวมความหนา ไม่รวมโครงสร้างแบบจำลองภายในของต้นไม้และใบไม้ และไม่รวมส่วนที่ไม่อาจมองเห็นด้วยตาเปล่าได้

3. งานวิจัยนี้ไม่รวมการสร้างแบบจำลองโครงสร้างของต้นไม้และใบไม้สำหรับการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงจากสภาพอื่นๆ สร้างแบบจำลองโครงสร้างของต้นไม้และใบไม้ในช่วงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากต้นไม้และใบไม้เมื่อมีการเจริญเติบโต อาจมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้จากลักษณะของพันธุ์ หรือจากสภาพแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆ เช่น ภาวะการขาดน้ำ โรคพืช และแมลง

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยมีดังนี้

1. ศึกษาค้นคว้าขั้นตอนวิธีที่มีอยู่ในปัจจุบัน ทฤษฎีทางคอมพิวเตอร์กราฟิก การสร้างภาพและแบบจำลองพืช
2. ออกแบบและพัฒนาขั้นตอนวิธีสำหรับสร้างแบบจำลองพืชแบบใหม่
3. ทดลองและปรับปรุงผลที่ได้จากขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นใหม่

4. พัฒนาโปรแกรมต้นแบบและเขียนรายงานทางวิชาการ

5. สรุปและวิจารณ์ผล

6. เขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ขั้นตอนวิธีสำหรับการสร้างแบบจำลองต้นไม้และใบไม้ เพื่อใช้สร้างต้นไม้และใบไม้เสมือนสำหรับนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งของการสร้างแบบจำลองพืช เหมาะสำหรับงานด้านคอมพิวเตอร์กราฟิก งานศิลปะ งานสร้างภาพเสมือนจริง

1.6 เนื้อหาในวิทยานิพนธ์นี้

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็นสามส่วนด้วยกัน กล่าวคือ ในส่วนแรกมีเนื้อหาเกี่ยวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและขั้นตอนวิธีที่ได้รับความนิยมใช้งานในปัจจุบันกล่าวถึงในบทที่ 2 ในส่วนที่สองเป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับพืชในธรรมชาติ กล่าวถึงโครงสร้างของพืช ในส่วนของลำต้นและใบ ในทางพฤกษศาสตร์ ซึ่งมีความจำเป็นที่จะแสดงรายละเอียดและภาพประกอบในบทที่ 3 และในส่วนที่สามของวิทยานิพนธ์นี้จึงกล่าวถึงขั้นตอนวิธีที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่โดยอาศัยแนวคิดจากธรรมชาติ ในส่วนที่สามนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 บท คือ บทที่ 4 แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองพืชและใบไม้ด้วยระบบ L-systems และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ต่อมาในบทที่ 5 แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับขั้นตอนการสร้างโครงสร้างแบบจำลองใบไม้ด้วย Particle Systems ซึ่งเป็นแนวคิดหลักของวิทยานิพนธ์นี้และมีประสิทธิภาพดีกว่าการสร้างแบบจำลองโครงสร้างด้วยวิธีอื่น ในบทที่ 6 ได้ปรับปรุงและพัฒนาขั้นตอนวิธีใหม่จากใบไม้มาใช้สร้างแบบจำลองโครงสร้างต้นไม้ บทที่ 7 ประกอบด้วยรายละเอียดของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับสร้างแบบจำลองตามขั้นตอนวิธีดังกล่าว บทที่ 8 นำเสนอข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

1.7 งานตีพิมพ์

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้รับการตีพิมพ์ในงานประชุมเชิงวิชาการในระดับนานาชาติ ดังนี้

- Y. Rodkaew, S. Siripant, C. Lursinsap, P. Chongstitvatana, T. Fujimoto and N.Chiba "Modeling Leaf Shapes using L-systems and Genetic Algorithms", In *Proceedings of NICOGRAPH international* (NICOGRAPH2002), Tokyo, Japan, May 2002, 73-78. กล่าวถึงการควบคุมโครงสร้างแบบจำลองใบไม้ด้วยระบบ L-systems และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 4
- Y. Rodkaew, S. Siripant, C. Lursinsap and P. Chongstitvatana, "An algorithm for generating vein images for realistic modeling of a leaf", In *Proceedings of Computational Mathematics and Modeling* (CMM2002), Bangkok, Thailand, May 2002. กล่าวถึงขั้นตอนวิธีสำหรับการสร้างโครงสร้างแบบจำลองใบไม้ด้วย Particle Transportation System ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในเนื้อหาหลักของวิทยานิพนธ์นี้ ได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 5
- Y. Rodkaew, P. Chongstitvatana, S. Siripant and C. Lursinsap, "Particle Systems for Plant Modeling", In *Proceedings of Plant Growth Modeling and Applications* (PMA03), 2003' International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and their Applications, Hu, B.-G., and Jaeger, M., Eds, Held in Beijing, China, 13-16 OCT 2003, 210-217. กล่าวถึงขั้นตอนวิธีสำหรับการสร้างโครงสร้างแบบจำลองใบไม้ด้วย Particle Systems และแสดงการประยุกต์ขั้นตอนวิธีสำหรับสร้างแบบจำลองพืชในส่วนของต้นไม้ และราก ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในเนื้อหาหลักของวิทยานิพนธ์นี้ ได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 6

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ ดังนี้

- Y. Rodkaew, S. Chuai-aree, S. Siripant, C. Lursinsap and P. Chongstitvatana "Animating Plant Growth in L-systems By Parametric Functional Symbols", *Journal of International Journal of Intelligent Systems*, Wiley, NewYork, 19(1/2), 2004, 9-23. กล่าวถึงการควบคุมโครงสร้างแบบจำลองพืชด้วยระบบ L-systems ในส่วนของต้นไม้โดยสมพร ช่วยอารีย์ (S.Chuai-aree) และการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสร้างแบบจำลองใบไม้ (Y.Rodkaew) ซึ่งได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 4

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

.. There is usually no 'right' model: producing similar temporal nor spatial patterns to those experimentally observed is only a first step and does not imply the model mechanism is the one which applies. Mathematical descriptions are not explanations.

--- J.D. Murray (1989:VI)
Mathematical Biology

ในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองพืชด้วยวิธีต่างๆ ตั้งแต่ปี 1983 จนถึงปัจจุบัน การจัดหมวดหมู่ของขั้นตอนวิธีในบทนี้ได้ปรับปรุงจากการจัดแบ่งในงานของ (P. Prusinkiewicz 1993) ซึ่งได้แบ่งขั้นตอนวิธีสำหรับการสร้างแบบจำลองพืชออกเป็นสองกลุ่มด้วยกันคือ แบบจำลองเน้นโครงสร้าง (structure-oriented) และ แบบจำลองเน้นพื้นที่ (space-oriented) แบบจำลองเน้นโครงสร้างนั้นแบ่งแบบจำลองออกเป็นส่วนย่อย และค้นหาว่าส่วนย่อยเหล่านั้น ประกอบกันเป็นโครงสร้างได้อย่างไร มีกฎอย่างไร มีรูปแบบการต่อเชื่อมกันอย่างไร ในทางตรงข้าม แบบจำลองเน้นพื้นที่ ใช้การพิจารณาว่าพื้นที่แบบนี้ควรมีลักษณะโครงสร้างภายในเป็นอย่างไรและใช้พื้นที่เป็นตัวกำหนดรูปแบบของโครงสร้าง สำหรับการจัดหมวดหมู่ของขั้นตอนวิธีในบทนี้ มีอยู่ด้วยกันสามกลุ่มเนื่องจากมีงานวิจัยใหม่บางส่วนที่ไม่อาจจัดเข้าในกลุ่มทั้งสองได้

2.1 แบบจำลองเห็นโครงสร้าง

2.1.1 Predefined surface

การสร้างพื้นผิวด้วย Predefined surface เป็นวิธีการมาตรฐานในการสร้างพื้นผิวโดยทั่วไปในคอมพิวเตอร์กราฟิก และนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างต้นไม้และใบไม้ได้ พื้นผิวอาจเป็นเพียงแผ่นราบ (surface) ที่ประกอบด้วยจุดพิกัดสามมิติอย่างน้อย 3 จุด หรือ เป็นผิวโค้งกำหนดด้วย bicubic patches ซึ่งเป็นโพลีโนเมียลกำลังสามของสมการ (2.1) ความคุมด้วยพารามิเตอร์ s และ t สำหรับจุดพิกัดสามมิติ $x(s,t)$ $y(s,t)$ และ $z(s,t)$ ผลที่ได้จากวิธีการนี้จะได้พื้นผิวที่มีความโค้งตามต้องการ

$$\begin{aligned} x(s,t) = & a_{11}s^3t^3 + a_{12}s^3t^2 + a_{13}s^3t + a_{14}s^3 \\ & + a_{21}s^2t^3 + a_{22}s^2t^2 + a_{23}s^2t + a_{24}s^2 \\ & + a_{31}st^3 + a_{32}st^2 + a_{33}st + a_{34}s \\ & + a_{41}t^3 + a_{42}t^2 + a_{43}t + a_{44} \end{aligned} \quad (2.1)$$

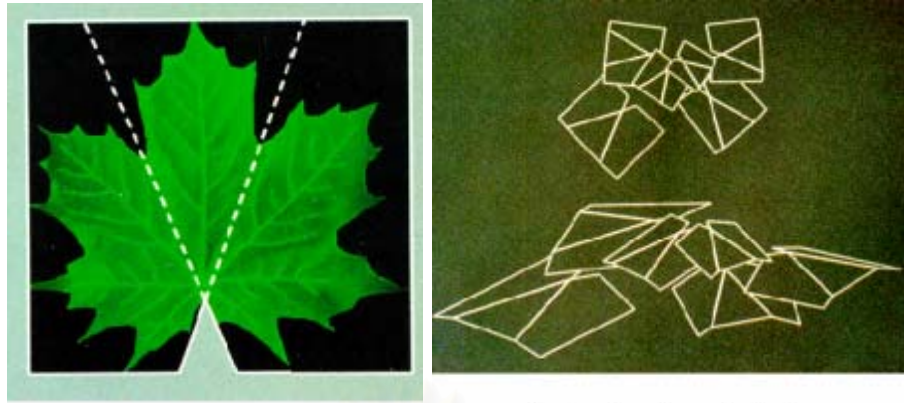
ที่มา: (Przemyslaw Prusinkiewicz and Aristid Lindenmayer 1990:119)



รูปที่ 1 ใบไม้สร้างจาก bicubic patches

ที่มา: (Przemyslaw Prusinkiewicz and Aristid Lindenmayer 1990:120)

ในงานของ J.Bloomenthal (1985) สร้างต้นไม้ Maple ด้วยวิธีนี้ ในส่วนของใบใช้พื้นผิวสามส่วนมาประกอบกัน ส่วนลำต้นใช้ spline curve กำหนดเป็นเส้นโค้งเป็นแกนกลาง และสร้างลำต้นด้วยของพื้นผิวรัศมีรอบเส้นโค้ง เนื่องจากวิธีนี้สร้างโครงสร้างภายนอกเท่านั้น ในส่วนรายละเอียดนั้นจึงใช้วิธีตรวจกวาด (scan) จากภาพจริงและนำมาใช้เป็นภาพพื้นผิว (texture) รูปที่ 2 แสดงภาพใบไม้จริงและนำมาประกอบเป็นกลุ่มของกิ่ง ในการแสดงรายละเอียดของส่วนลำต้นใช้วิธีเดียวกัน คือนำภาพพื้นผิวจากต้นไม้จริงมาติดรอบพื้นผิวรัศมีรอบเส้นโค้งลำต้น



รูปที่ 2 ภาพใบไม้จริงแบ่งออกเป็นสามส่วน (ซ้าย) การจัดวางของกลุ่มใบไม้ (ขวา)



รูปที่ 3 กิ่งไม้และใบไม้ (ซ้าย) ต้น Maple (ขวา)

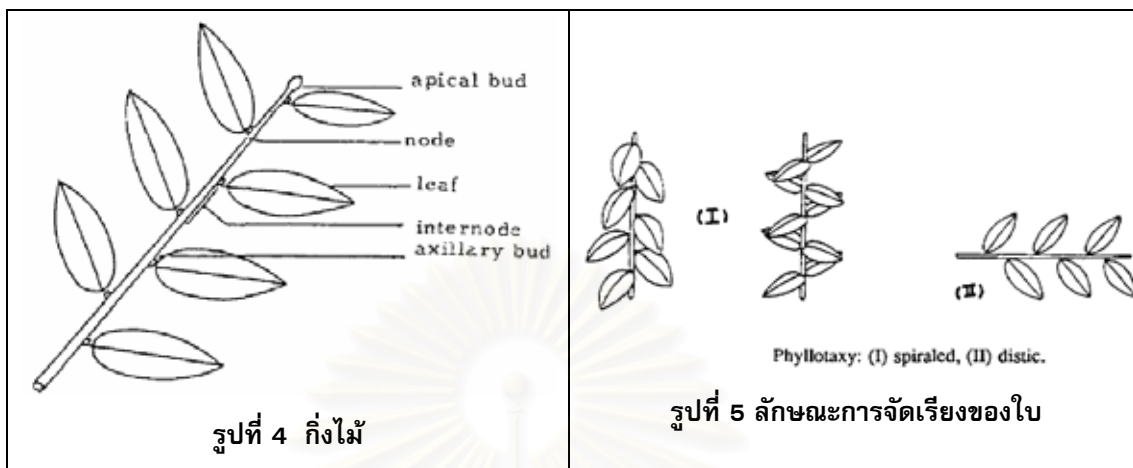
ที่มา: (J.Bloomenthal 1985)

วิธีนี้สามารถสร้างต้นไม้และใบไม้ได้ดี แต่มีข้อเสียคือ สำหรับพื้นผิวโค้งการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับรูปร่างต่างๆ ทำได้ยาก และไม่สามารถสร้างรายละเอียดภายในเช่นเส้นใบได้เองต้องอาศัยภาพพื้นผิว รูปร่างของใบมีขนาดต่างกันแต่ลักษณะแบบเดียวกัน เนื่องจากใช้ภาพพื้นผิวอันเดียวกัน

2.1.2 แบบจำลองพืชโดยรูปแบบโครงสร้างทางพฤกษศาสตร์

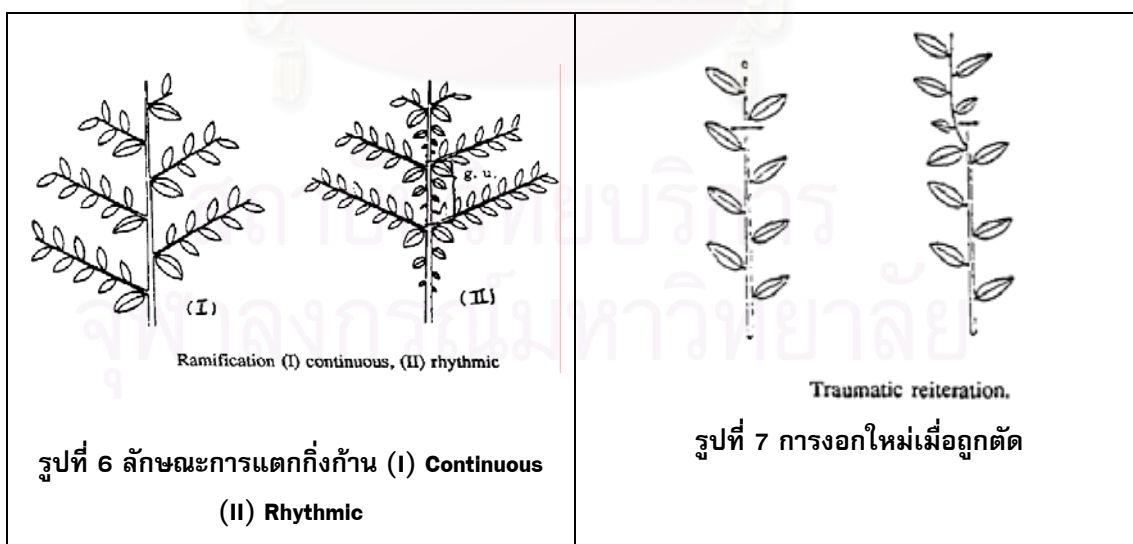
รูปแบบโครงสร้างทางพฤกษศาสตร์ได้นำมาประยุกต์ใช้ในงานของ P. de Reffye เมื่อปี ค.ศ. 1988 (de Reffye et. al 1988) ใช้ลักษณะของการจัดวางรูปทรงและ กฎของพฤกษศาสตร์ (botanical laws) สำหรับอธิบายการเจริญเติบโตและรูปแบบทางธรรมชาติของพืช de Reffye มีความเห็นว่าการสร้างลักษณะที่หลากหลายของพืชนั้นถ้าได้นำแบบจำลองทางพฤกษศาสตร์กับ ฟิสิกส์ร่วมกันด้วยความรู้เกี่ยวกับพืชและผลจากสภาพแวดล้อมนั้นมีความเป็นไปได้ เช่น อายุของพืช เงื่อนไขของการเจริญเติบโต แรงดึงดูดของโลกหรือแรงลมที่กระทำต่อกิ่งไม้ ความคิดใน

งานวิจัยของ P. de Reffye นั้นเน้นรูปแบบของการเชื่อมต่อ (topology) มากกว่าลักษณะรูปร่างโครงสร้าง (geometric) ของพืช



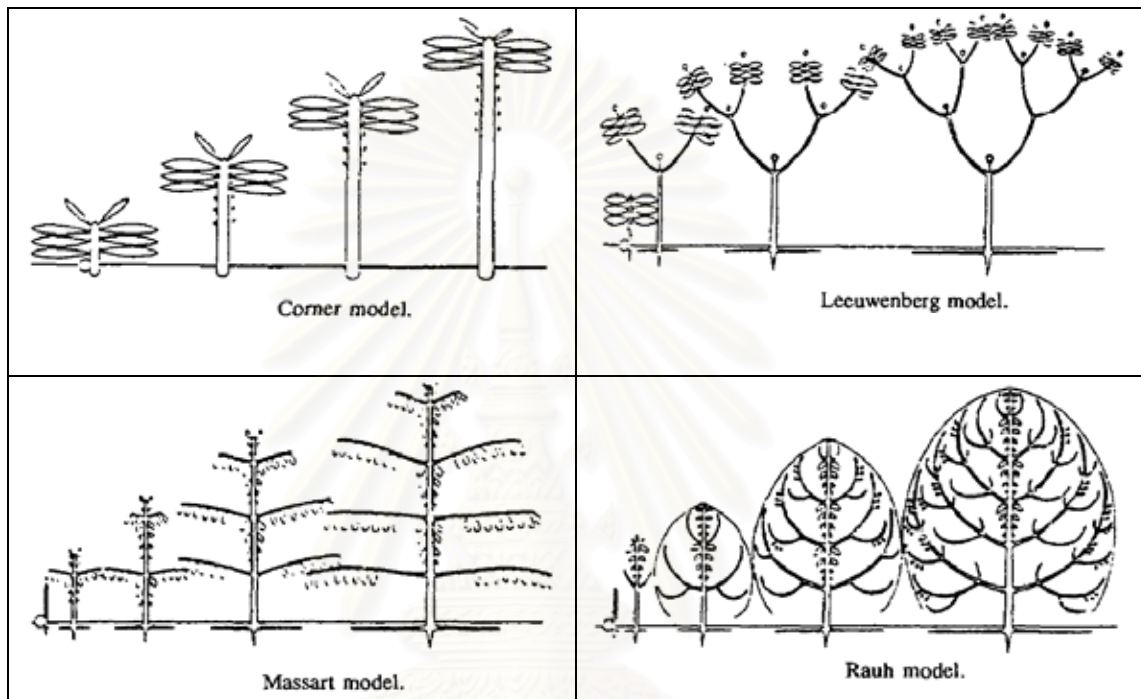
ที่มา: (P. de Reffye, C. Edelin, J. Francon, M.Jarger, and C. Puech 1988)

ในแบบจำลองของ P. de Reffye กล่าวว่า การเจริญเติบโตของพืชเป็นผลมาจากการพัฒนาของเนื้อเยื่อเจริญ (meristem) ซึ่งกำหนดให้เป็นส่วนตาของพืช เมื่อผ่านไปช่วงเวลาหนึ่ง ตาจะมีการเปลี่ยนแปลงไปได้ 3 รูปแบบ คือ 1) การหยุดการทำงานหรือตาย (die or abort) หรือ 2) เปลี่ยนแปลงไปเป็นดอก (flower) หรือช่อดอก (inflorescence) หรือ 3) เจริญต่อไปเป็นกิ่งดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4 นอกจากนี้แบบจำลองของ P. de Reffye ยังได้กล่าวอธิบายถึงลักษณะการจัดเรียงของใบ (รูปที่ 5) ลักษณะการแตกกิ่งก้าน (รูปที่ 6) และการงอกกิ่งใหม่เมื่อกิ่งถูกตัดออก (รูปที่ 7)



ที่มา: (P. de Reffye, C. Edelin, J. Francon, M.Jarger, and C. Puech 1988)

ในงาน P. de Reffye นั้นยังกล่าวถึงงานของ Halle, Oldeman and Tomlinson 1978 นักพฤกษศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบโครงสร้างของต้นไม้ (tree architecture) แบบต่างๆ ซึ่งพบว่ามียู่ด้วยกัน 23 รูปแบบ และเป็นที่น่าสนใจว่า เมื่อต้นไม้เติบโตขึ้นมาก็ยังสามารถสร้างกิ่งใหม่และรักษารูปแบบโครงสร้างของลำต้นทั้งหมดไว้ได้เหมือนเดิม รูปที่ 8 แสดงลักษณะของรูปแบบทรงพุ่มหรือเรือนยอดของไม้ต้นที่พบบ่อย คือ Corner, Leeuwenberg, Massart และ Rauh¹



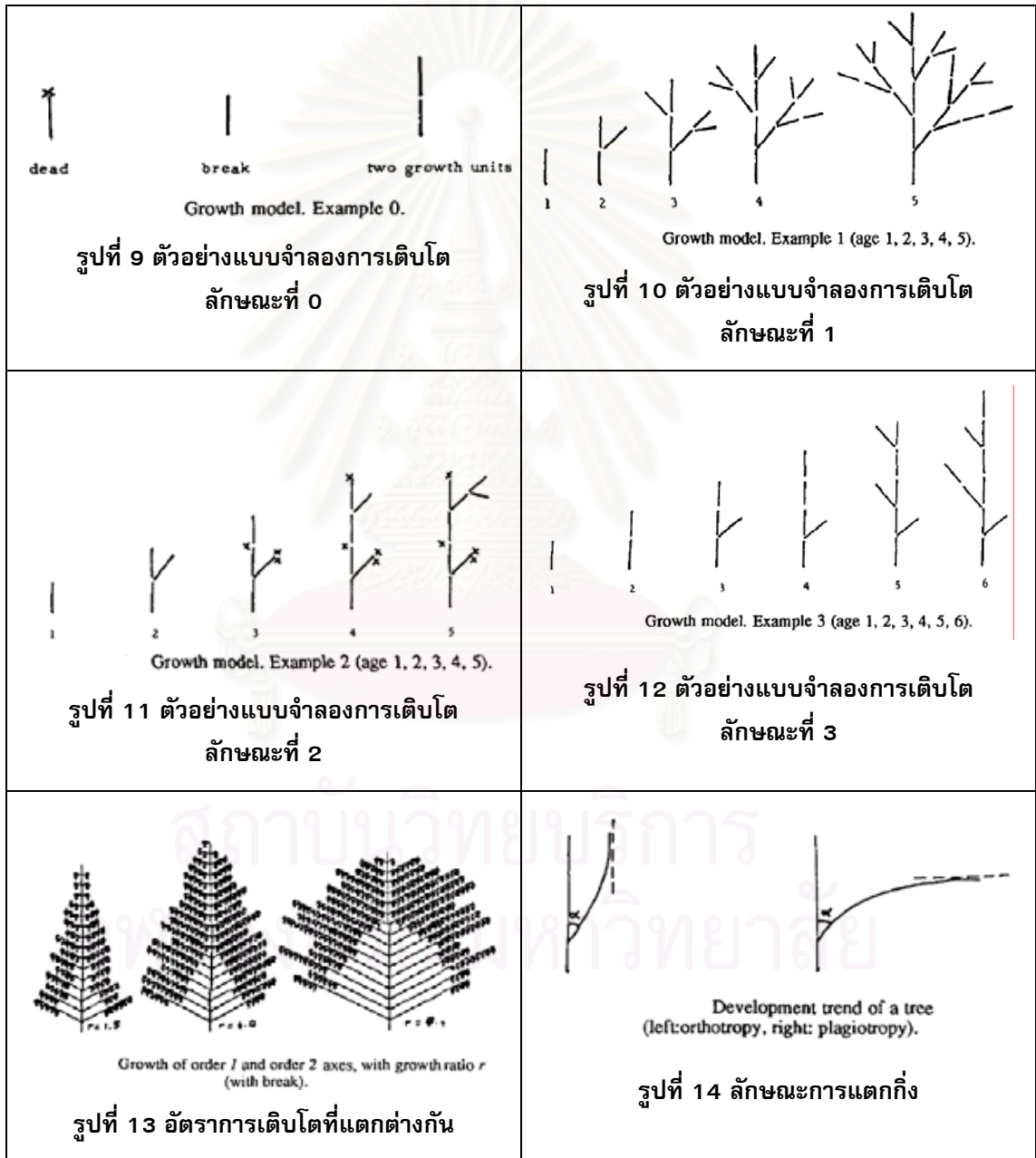
รูปที่ 8 รูปแบบของทรงพุ่มหรือเรือนยอดของ Corner, Leeuwenberg, Massart และ Rauh

ที่มา: (P. de Reffye, C. Edelin, J. Francon, M.Jarger, and C. Puech 1988)

Corner's model มีเพียงแกนเดียว ไม่มีกิ่งก้านแยกออกมา ตัวอย่างเช่นต้นมะพร้าว (coconut trees), Leeuwenberg's model ตายอด (apical buds) จะตายโดยอัตโนมัติ เมื่อแตกกิ่งออกมาสองกิ่ง ตัวอย่างเช่น frangipani trees (ไม้จำพวกกลิ่นหอมและชวนชม), Massart's model แกนหลักมีลักษณะตั้งตรง (orthotropic) ส่วนแกนที่แตกแขนงออกมามีลักษณะแผ่ออกด้านข้าง (plagiotropic) ตัวอย่างเช่น fir trees (ไม้จำพวกสน - เฟอริ มีใบแหลม), spruce trees (ไม้จำพวกสน - ชพรุช) และ cedar trees (ไม้ชนิดหนึ่งเพียวคล้ายยมหอม), Rauh's model ทุกๆ แกนงอกออกและแตกกิ่งออกมาโดยตลอด ตัวอย่างเช่น poplar trees (ไม้ชนิดหนึ่งต้นตรงใบหนา), aspen trees (ไม้ชนิดหนึ่งคล้ายต้นสน จีนเรียกว่าหยิ่งหลิว), pine trees (ต้นสน) และ fruit trees

¹ เรียกตาม P. de Reffye สันนิษฐานว่าเป็นชื่อผู้สร้างแบบจำลองต้นไม้ในลักษณะนั้นๆ เนื่องจากชื่อเหล่านี้ไม่ได้เป็นชื่อเรียกลักษณะของต้นไม้ในทางพฤกษศาสตร์

ในงานวิจัยอ้างอิงถึงวิทยานิพนธ์ของ P. de Reffye เกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างพืช ซึ่งให้ความสำคัญกับสามสิ่งคือ การเจริญเติบโต (growth) การแตกกิ่ง (ramification) และ การตาย (mortality) ซึ่งทั้งสามสิ่งนี้มีความสัมพันธ์กับช่วงเวลาโดยใช้ระยะเวลาเป็นตัวกำหนดว่าจะมีอัตราการเจริญเติบโตเป็นเท่าใดหรือในรูปแบบใด ในส่วนของตานั้นมีความน่าจะเป็นคือ หยุด (abort, dead) หรือรอ (wait, break) จนกระทั่งครบช่วงเวลาที่ได้กำหนดไว้ จากนั้นตาก็จะมีการเติบโตและงอกออกเป็นกิ่งใหม่ (รูปที่ 9)



ที่มา: (P. de Reffye, C. Edelin, J. Francon, M.Jarger, and C. Puech 1988)

เมื่อมีลักษณะการแตกกิ่งใหม่เกิดขึ้นได้หลายแบบ ทำให้สร้างแบบจำลองได้หลายรูปแบบ ในตัวอย่างที่ 1 (รูปที่ 10) แสดงลักษณะของการแตกกิ่งใหม่เมื่อความน่าจะเป็นของการหยุดและการตายมีค่าเท่ากับ 0 ในตัวอย่างที่ 2 (รูปที่ 11) แสดงลักษณะของการแตกกิ่งใหม่เมื่อความน่าจะเป็นของการหยุดมีค่าเท่ากับ 0 และการตายมีค่าความน่าจะเป็นมากกว่า 0 ในตัวอย่างที่ 3 (รูปที่ 12) แสดงลักษณะของการแตกกิ่งใหม่ ในการแตกกิ่งใหม่ครั้งแรกมีความน่าจะเป็นของการตายและการหยุดมีค่าเท่ากับ 0 และมีค่าแตกต่างกันสำหรับการงอกแตกกิ่งใหม่ในครั้งต่อไป ในตัวอย่างที่ 4 (รูปที่ 13) การสร้างกิ่งใหม่ในลำดับที่ 1 และ 2 เท่านั้นที่มีอัตราการตายและอัตราการหยุดเท่ากับ 0 ส่วนการแตกกิ่งตั้งแต่ลำดับที่ 1 ไปจนถึงลำดับที่มากกว่านั้น จะกำหนดให้อัตราการงอกมีค่าเท่ากับ r แต่ไม่มีการหยุด และมีการจำลองการร่วงของใบด้วยในแบบจำลองนี้มีความคล้ายกับ *robusta coffee tree* ส่วนในรูปที่ 14 นั้นแสดงมุมของกิ่งซึ่งมีอยู่ด้วยกันสองแบบคือแนวนอน (*plagiotropy*) และแนวตั้ง (*orthotropy*)

ในแต่ละส่วนประกอบเช่น ตา กำหนดด้วยช่วงเวลา การจำลองและทดสอบตามเงื่อนไข เช่น ช่วงชีวิต การหยุด การแตกกิ่ง หลังจากการทดสอบตาอาจจะหยุด (*suppressed*) หรือสร้างกิ่งใหม่ แสดงเป็น *pseudo-code* ดังนี้

```

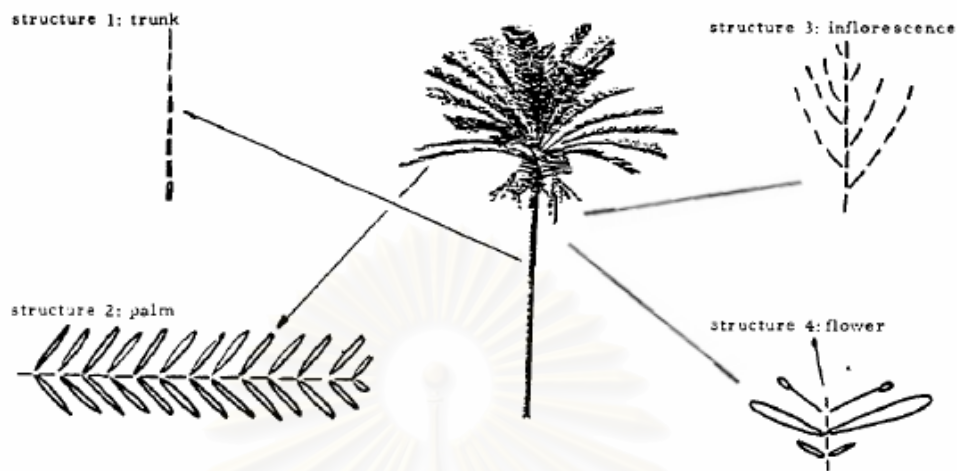
for each clock signal do
  for each bud which is still alive do
    {order, age dimension, position, etc. are known attributes of the bud}
    if bud doesn't die then
      if bud doesn't make a pause then
        create internode {with position in space}
        create apical bud
        for each possible bud do
          if ramification then create axillary buds
            {with age, order and dimension}
        endfor
      endif
    endif
  endfor

```

ที่มา: (P. de Reffye, C. Edelin, J. Francon, M.Jarger, and C. Puech 1988)

แบบจำลองอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง สามารถใช้กับแบบจำลองนี้ได้ เช่นการเปลี่ยนสีของใบไม้เมื่อฤดูใบไม้ร่วง หรือใบไม้ที่หลุดร่วง ถูกกำหนดด้วยช่วงเวลา ซึ่งกำหนดเป็นค่าคงที่ การสร้างช่อดอกไม้ หรือการเกิดผลไม้ ช่วงเวลาที่กำหนดสามารถใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดของนักพฤกษศาสตร์มาประกอบได้โดยง่าย สำหรับการตัดแต่งกิ่ง (*prunning*) ก็สามารถจำลองได้ โดยคล้ายกับตาทั้งหมดภายในกิ่งถูกกำหนดให้ตายและร่วงหล่น การจำลองที่เกี่ยวกับแรงโน้มถ่วงสามารถใช้การโน้มเอียงของกิ่งจากแรงกระทำของแรงโน้มถ่วงและแรงลมโดยใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับความเค้นของวัสดุ (*material strength*) โดยกำหนดให้รูปร่างภายในของมีการควบคุมพารามิเตอร์ของลักษณะความยืดหยุ่น (*elastic parameters*) การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีนี้อาจจะใช้วิธีแบ่งการกำหนดโครงสร้างของเป็นส่วนย่อย และนำแต่ละส่วนมาประกอบกันเป็น

แบบจำลองขนาดใหญ่ได้ เช่น ต้นปาล์ม ประกอบด้วย ส่วนของลำต้น ส่วนของใบ ส่วนโครงสร้างของช่อดอก และดอกไม้ (รูปที่ 15)



รูปที่ 15 โครงสร้างสี่ส่วนสำหรับสร้างต้นปาล์ม

ที่มา: (P. de Reffye, C. Edelin, J. Francon, M.Jarger, and C. Puech 1988)



รูปที่ 16 ต้นไม้แบบต่างๆ

ที่มา: (P. de Reffye, C. Edelin, J. Francon, M.Jarger, and C. Puech 1988)

2.1.3 แบบจำลองพืชจากการวัดและคณิตศาสตร์

ในงานของ J. Weber and J. Penn 1995 เสนอแนวคิดเกี่ยวกับการสร้างโครงสร้างแบบเรียบง่ายโดยใช้เพียงความรู้ที่เกี่ยวกับเรขาคณิตพื้นฐาน เนื่องจากโครงสร้างพืชนั้นมีความซับซ้อนสูง และมีความยากในการกำหนดแบบจำลองที่สร้างขึ้น ดังนั้นจึงเน้นการสร้างแบบจำลองพืชโดยใช้วิธีเรียบง่ายแทน และไม่ยึดติดกับโครงสร้างทางพฤกษศาสตร์ แต่ต้องการแบบจำลองที่มีความเหมือนจริง จึงได้นำเสนอวิธีลดคุณภาพ (degrade) แบบจำลองเพื่อการสร้างแบบจำลองพืชจำนวนมากเช่นบริเวณป่าเป็นต้น

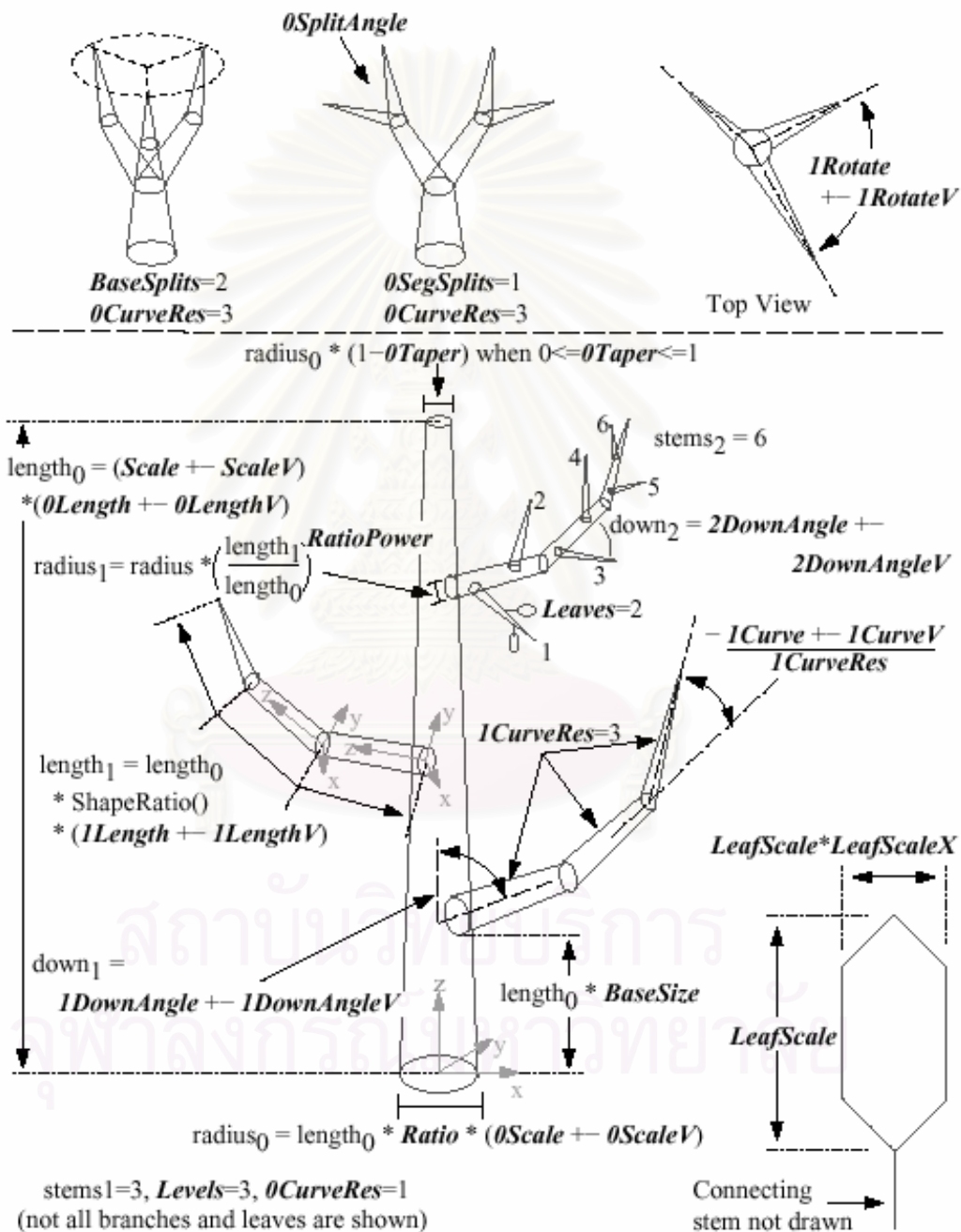
J. Weber and J. Penn กล่าวว่าความสมจริงนั้นอยู่ที่ความถูกต้องของรูปทรงเมื่อต้องแสงเงา ดังนั้นต้นไม้ควรมีลักษณะสามมิติ โดยส่วนใหญ่ภาพต้นไม้อยู่บริเวณพื้นหลังของภาพและมีความสูงที่แตกต่างกันประมาณ 5-20% ของความสูงของภาพ ดังนั้นรายละเอียดต่างๆ เช่น ความโค้งงอของใบและเส้นใบนั้นไม่จำเป็นสำหรับการนำเสนอภาพที่มีขนาดความสูงน้อยมาก แต่โครงสร้างของลำต้นไม้ และกิ่งต่างๆ ที่สำคัญนั้นต้องจัดวางอย่างถูกต้อง เมื่อคำนึงถึงแบบจำลองต้นไม้ที่ควรจะสามารถสร้างรูปร่างต้นไม้ทั่วไปเช่นทรงพุ่มของต้นไม้ต่างๆ ได้หลายแบบ ในการแบบจำลองของ J. Weber and J. Penn จึงกำหนดให้โครงสร้างของต้นไม้เริ่มต้น ในแต่ละกิ่งย่อยมีลักษณะเป็นรูปทรงกรวยต่อกัน โดยที่กิ่งไม้แต่ละอันจะมีคุณสมบัติคือ อัตราส่วนความยาวของกิ่งรองที่งอกมาใหม่จากกิ่งหลัก ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวน้อยกว่า 1 ทำให้การงอกกิ่งลำดับรองออกมามีความยาวลดลงเรื่อยๆ ด้วยลักษณะดังกล่าวนี้อาจกำหนดให้เป็น การวนซ้ำตามลำดับ 3-4 รอบได้และทำให้สร้างเป็นฟังก์ชันการวนซ้ำที่มีพารามิเตอร์ควบคุมได้ในที่สุด (รูปที่ 17)

ในแต่และกิ่งไม้มีแกนตำแหน่งเป็นของตัวเอง ในกิ่งหลัก (ลำต้น) ใช้แกน Z เป็นแกนเดียวที่ขนานกับความยาวของกิ่งไม้ ส่วนแกน X และแกน Y ขนานกับพื้นตามกฎมือขวา (right-hand rule)² ในแต่ละกิ่งไม้ประกอบด้วยส่วนย่อยทรงกระบอกกำหนดโดย nCurveRes ถ้า nCurveBack เป็น 0 แกน Z หมุน nCurve/nCurveRes องศา รอบแกน X ถ้า nCurveBack มีค่าไม่เท่ากับ 0 แต่ละส่วนจะหมุนเพียงครั้งเดียวคือ nCurve/(nCurveRes/2) องศา และอีกครึ่งหนึ่งจะหมุน nCurveBack/(nCurveRes/2) องศา การแบ่งการหมุนออกเป็นสองส่วนนี้สร้างกิ่งรูปตัว S ได้ ในกรณีพิเศษเพิ่มค่ามุม nCurveV/nCurveRes ในกรณีนี้กิ่งจะมีรูปทรงแบบเกลียว Helix และมุมเงย (declination) กำหนดโดย nCurveVary

การแบ่งแยกกิ่งกำหนดด้วย nSegSplits แทนจำนวนของกิ่งที่แบ่งออก จำนวนของกิ่งอาจมีจำนวนมากเกินไปเมื่อ ค่า nSegSplits มีจำนวนมาก การคำนวณหาจำนวนของกิ่งสามารถทำได้โดยใช้สมการ $(nSegSplits+1)^{(nCurveRes-1)}$ ตัวอย่างเช่น nCurveRes=5; nSegSplits=2; จะเกิดจำนวนของกิ่งทั้งหมด = $3^4 = 81$ ในตัวอย่าง (รูปที่ 17) เมื่อต้นไม้มี 0SegSplits=1; และ 0CurveRes=3; ดังนั้นจะมีกิ่งทั้งหมด $(1+1)^{(3-1)}=4$ มีพารามิเตอร์เพิ่มคือ nBaseSplits ซึ่งทำหน้าที่เดียวกับ nSegSplits การกำหนดเพิ่มนี้ทำให้ จำนวนการแยกกิ่งที่ตำแหน่งของแกนต้นไม้อันหลัก และจำนวนการแยกกิ่งในระดับอื่นๆ แยกกัน เนื่องจากส่วนของลำต้นนั้นมีจำนวนกิ่งมาก แต่กิ่งในระดับรองมีการแยกออกเพียงสองหรือสามกิ่งเท่านั้น ค่าของ nSegSplits อาจเป็นจำนวนทศนิยมได้ เนื่องจากค่านี้เป็นตัวกำหนดการแยกกิ่งโดยตลอดทั้งกิ่ง ตัวอย่างเช่น 1.2 จะทำให้กิ่งจำนวนเดียวที่ไม่ถูกแบ่งแยกมีโอกาส 80% และการแยกกิ่งของสองกิ่งมีโอกาส 20% แต่การใช้เลขสุ่มเพื่อกำหนดว่าจะใช้การแยกกิ่งจำนวนเท่าใดนั้นไม่ถูกต้องเนื่องจากกิ่งลำดับ

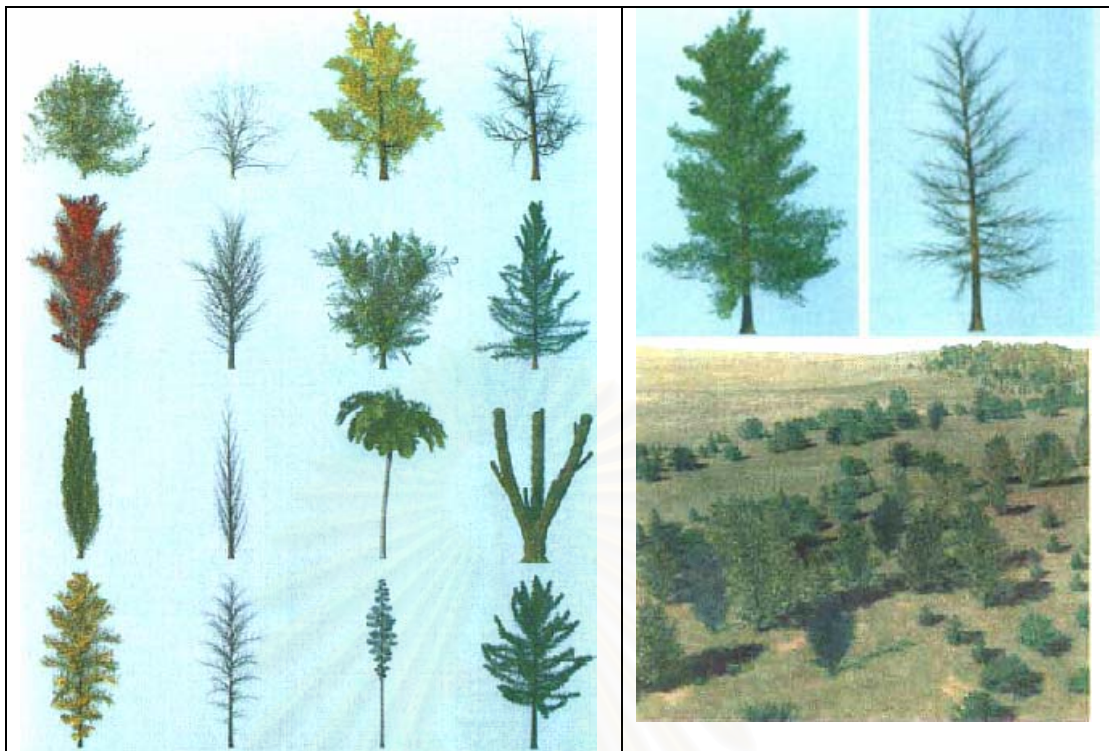
2 กฎมือขวา ใช้มือขวาปลายนิ้วแทนแกน X ด้านข้อมือแทนแกน Y ทิศของนิ้วหัวแม่มือแทนทิศของแกน Z แกน $X \rightarrow Y$ ได้ทิศ แกน Z ; การ Cross Vector AXB เป็นไปตามกฎมือขวา $Z=XY$

ย่อยรวมกันจะมีจำนวนมากกว่าอัตราที่กำหนดไว้ การแก้ไขปัญหานี้ใช้วิธีเดียวกับ Floyd-Steinberg Error Diffusion (R. Floyd and L. Steinburg 1976) คือมีจำนวนที่เก็บค่าความผิดพลาดสะสมไว้ ทุกๆ ครั้งเมื่อใช้ nSegSplits ค่าความผิดพลาดนี้จะเก็บไว้ในตัวแปร SegSplits_{effective} และปิดเศษให้เข้าใกล้จำนวนเต็มค่าที่ใกล้ที่สุด จำนวน (SegSplits_{effective} - nSegSplits) จะนำไปลบออกจากค่าความผิดพลาดสะสม ถ้าจำนวนนี้ถูกปัดขึ้น ในครั้งต่อไปจะถูกปัดลง ในรูปที่ 18 แสดงภาพโครงสร้างของต้นไม้ที่สามารถสร้างได้จากแนวความคิดนี้



รูปที่ 17 แผนภาพโครงสร้างต้นไม้

ที่มา: (J. Weber and J. Penn 1995)



รูปที่ 18 ต้นไม้จากงานของ J. Weber and J.Penn 1995

2.1.4 Fractals

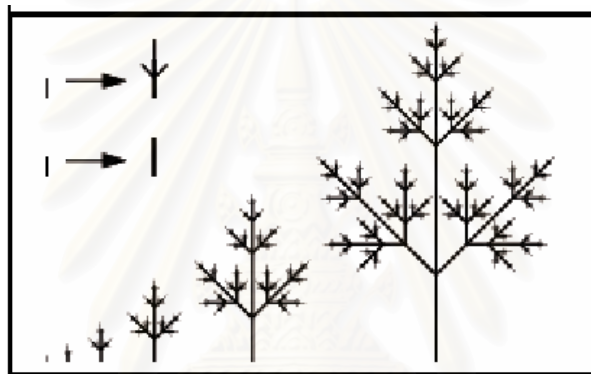
แฟร็กทัล (Fractals) คือสิ่งที่ประกอบด้วยรูปร่างหรือรูปทรงที่ความเหมือนกันแต่มีขนาดที่แตกต่างกัน (self-similar) ลักษณะของเส้นใบไม้มีลักษณะเช่นเดียวกับแฟร็กทัลกล่าวคือเส้นใบไม้หลักมีรูปร่างคล้ายกับเส้นใบไม้อยู่แต่มีขนาดเล็กลง ในงานของ Peter E. Oppenheimer (1986) จึงใช้แฟร็กทัลเป็นตัวสร้างลายเส้นของใบไม้ (รูปที่ 19) การนำเส้นใบไม้ที่มีขนาดเล็กๆ ที่แตกต่างกันมาประกอบเข้าด้วยกันช่วยเพิ่มรายละเอียดของเส้นใบไม้ให้มีรายละเอียดมากขึ้น



รูปที่ 19 ใบไม้สร้างด้วย Fractal (Penter E. Oppenheimer 1986)

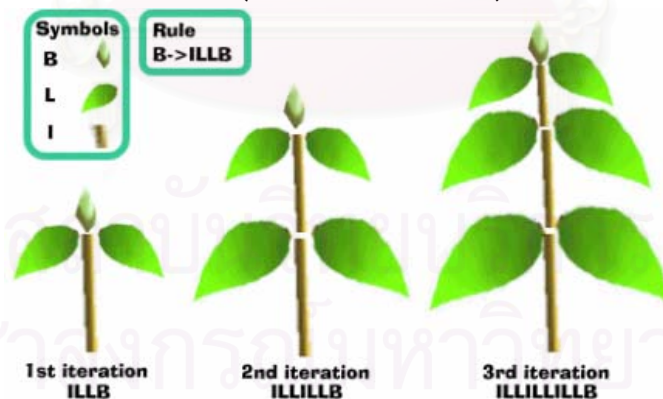
2.1.5 L-systems

Lindermayer Sytems หรือ L-systems (P. Prusinkiewicz 1990) เป็นระบบที่ถูกสร้างและพัฒนาโดยนักพฤกษศาสตร์ Aristid Lindermayer เป็นระบบที่นำคณิตศาสตร์มาช่วยในการใช้อธิบายการเจริญเติบโตของพืช รวมไปถึงโครงสร้างของสิ่งมีชีวิตอื่นๆ แนวคิดหลักของ L-systems คือระบบเขียนใหม่ (Rewriting system) ภายในภาษา (Language) ที่กำหนดประกอบด้วย ไวยากรณ์ (Grammar) และ นิพจน์ (Expression) เนื่องจาก L-systems มีคลาส (Class) หลายชนิดในที่จะยกตัวอย่างเพียง 2 ชนิดคือ DOL-systems และ Parametric OL-systems³



รูปที่ 20 การวนซ้ำใน L-systems

ที่มา: (P. Prusinkiewicz 2000)



รูปที่ 21 ต้นไม้ใน L-systems

ที่มา: (Y.Rodkaew et al. 2000b)

³ DOL-systems และ Parametric OL-systems (ใช้ตัวอักษรโอใหญ่) มีคุณสมบัติไม่พึ่งบริบท เป็นคลาสสูงของ OL-systems มีคลาสอื่นๆ ของ L-systems ที่มีคุณสมบัติพึ่งบริบทคือ 1L-systems และ 2L-systems เป็นคลาสสูงของ IL-systems

2.1.5.1 DOL-systems

เป็นคลาสที่ง่ายที่สุดของ L-systems มีคุณสมบัติ กำหนด (Deterministic) และไม่พึ่งบริบท (Context-free) ตัวอย่างเช่น ให้มีข้อความ (String) สร้างจาก ตัวอักษร (Letter) a และ b แต่ ตัวอักษรมีความสัมพันธ์กับ กฎเขียนใหม่ (Rewriting rule) ดังนี้ กฎ $a \rightarrow ab$ มีความหมายว่าอักษร a จะเปลี่ยนไปเป็นข้อความ ab และกฎ $b \rightarrow a$ มีความหมายว่าอักษร b จะเปลี่ยนไปเป็น a เมื่อเริ่มต้นเปลี่ยนข้อความ ข้อความที่กำหนดให้เริ่มแรกจะเรียกว่า สัจพจน์ (Axiom) ใช้แทนด้วยสัญลักษณ์ ω สมมติให้เป็น ข้อความ b ในการเขียนใหม่ครั้งแรก (first rewriting) หรืออาจเรียกว่า การแปลงครั้งแรก (first derivation) สัจพจน์ b จะแทนที่โดย การผลิต (production) $b \rightarrow a$ ทำให้สัจพจน์ b เปลี่ยนเป็น สัจพจน์ a ในการเปลี่ยนครั้งที่สอง a เปลี่ยนเป็น ab โดย $a \rightarrow ab$ ในการเปลี่ยนครั้งที่สาม a เปลี่ยนเป็น ab และ b เปลี่ยนเป็น a ทำให้เกิดผลลัพธ์เป็น aba

2.1.5.2 Parametric OL-systems

เป็นคลาสที่เพิ่มความสามารถให้ L-systems มีคุณสมบัติ กำหนด (Deterministic) และไม่พึ่งบริบท (Context-free) โดยมีพารามิเตอร์กำหนดให้เลือกความสัมพันธ์กับกฎการเปลี่ยนที่เหมาะสม ดังนี้ กฎ $a(t) : t=0 \rightarrow a(t+1)b$ และ กฎ $a(t) : t>0 \rightarrow a(t+1)c$ หมายความว่าเมื่อให้ $a(t)$ มีพารามิเตอร์ t มีค่าเท่ากับ 0 ข้อความ $a(0)$ จะเปลี่ยนไปเป็น $a(1)b$ เนื่องจากมีความสอดคล้องกับกฎ $a(t)$ ที่หนึ่งคือเมื่อ $t=0$ และในการเปลี่ยนครั้งที่สองข้อความ $a(1)b$ มีความสอดคล้องกับกฎ $a(t)$ ที่สองคือเมื่อ $t>0$ ดังนั้น ข้อความจึงเปลี่ยนจาก $a(1)b$ เป็น $a(2)cb$

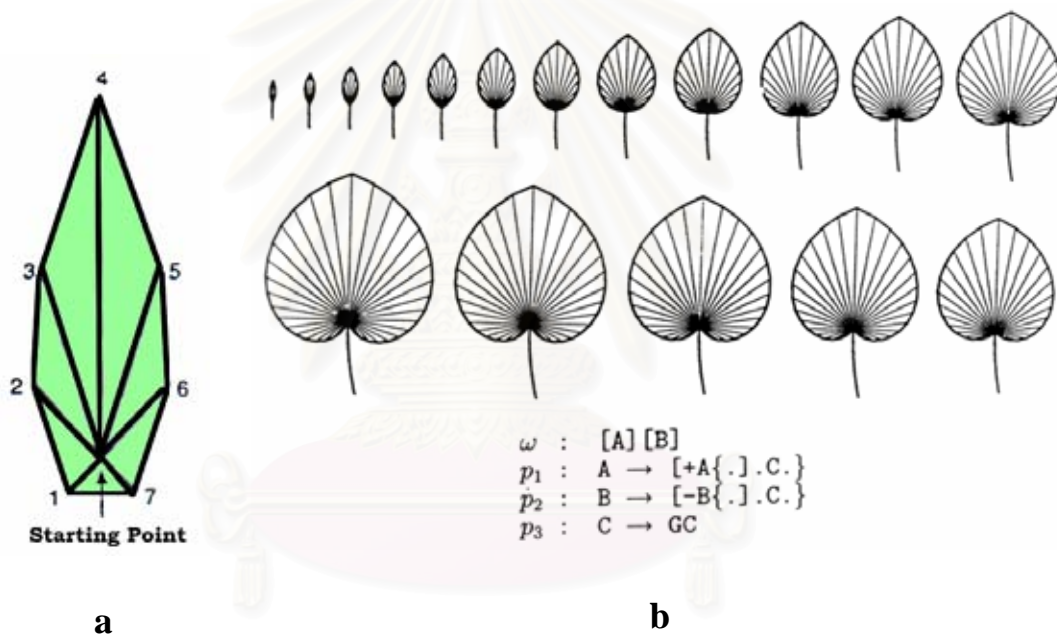
2.1.5.3 Turtle Graphics

สัญลักษณ์ที่ได้จาก L-systems นำมาใช้สร้างภาพด้วยการแทนสัญลักษณ์หนึ่งๆ ด้วยภาพและการเคลื่อนที่ โดยใช้ Turtle Graphics คล้ายกับภาษา LOGO (H. Abelson and A.A. diSessa 1982) มีเต่า (Turtle) สมมติซึ่งเคลื่อนที่ไปยังทิศทางต่างๆ ด้วยคำสั่งแทนด้วยสัญลักษณ์ เช่น F แทนความหมายเดินหน้า + เลี้ยวขวา - เลี้ยวซ้ายเป็นต้น การวาดรูปสี่เหลี่ยมกระทำได้โดยใช้กฎ $\omega \rightarrow AAAA$ และ $A \rightarrow F+$ เพื่อให้เกิดผลลัพธ์เป็นข้อความ $F+F+F+F+$ ซึ่งมีความหมายว่าเดินหน้าและเลี้ยวขวา เมื่อทำครบสี่ครั้งจะได้รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ใช้หลักการเดียวกันนี้ในการวาดภาพต้นไม้กล่าวคือแทนสัญลักษณ์ l หมายถึงลำต้น L หมายถึงใบ F หมายถึงดอก การกำหนดว่าลำต้นมีความยาวเท่าใดจะขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรใน Parametric OL-systems เช่น $l(5)$ มีความหมายว่าลำต้นมีความยาว 5 หน่วย หรือ $L(4.2)$ อาจหมายถึงใบมีขนาดยาว 4.2 หน่วย เป็นต้น การกำหนดสัญลักษณ์และความหมายนี้ไม่จำเป็นต้องใช้เหมือนกัน อาจกำหนดขึ้นเองได้

ในหนังสือ The Algorithmic Beauty of Plants (P. Prusinkiewicz 1990) กล่าวถึงวิธีการสร้างใบไม้ด้วย L-systems แบ่งออกเป็นสองวิธีคือ การสร้างใบไม้แบบใบเดี่ยวและการสร้างใบไม้แบบใบประกอบ

2.1.5.4 การสร้างใบไม้ด้วย L-systems แบบใบเดี่ยว

สร้างใบไม้จากการใช้สัญลักษณ์กำหนดขอบของพื้นผิวเพื่อสร้างเป็น รูปหลายมุม (polygon) จากการเคลื่อนที่ของเต่าภายในขอบเขต { } ให้สัญลักษณ์ { และ } หมายถึงการระบายสีเส้นภายใน สัญลักษณ์ . (จุด) แทนตำแหน่ง จุดยอด (vertex) สัญลักษณ์ G มีความหมายเดินหน้า และหมายถึง เส้นเชื่อม (edge) ของ รูปหลายมุม (polygon) ด้วย หมายเลขลำดับการกำหนดจุดแสดงในรูปที่ 22a การสร้างใบไม้รูปหัวใจจากลำดับการหนดจุดดังกล่าว แสดงในรูปที่ 22b

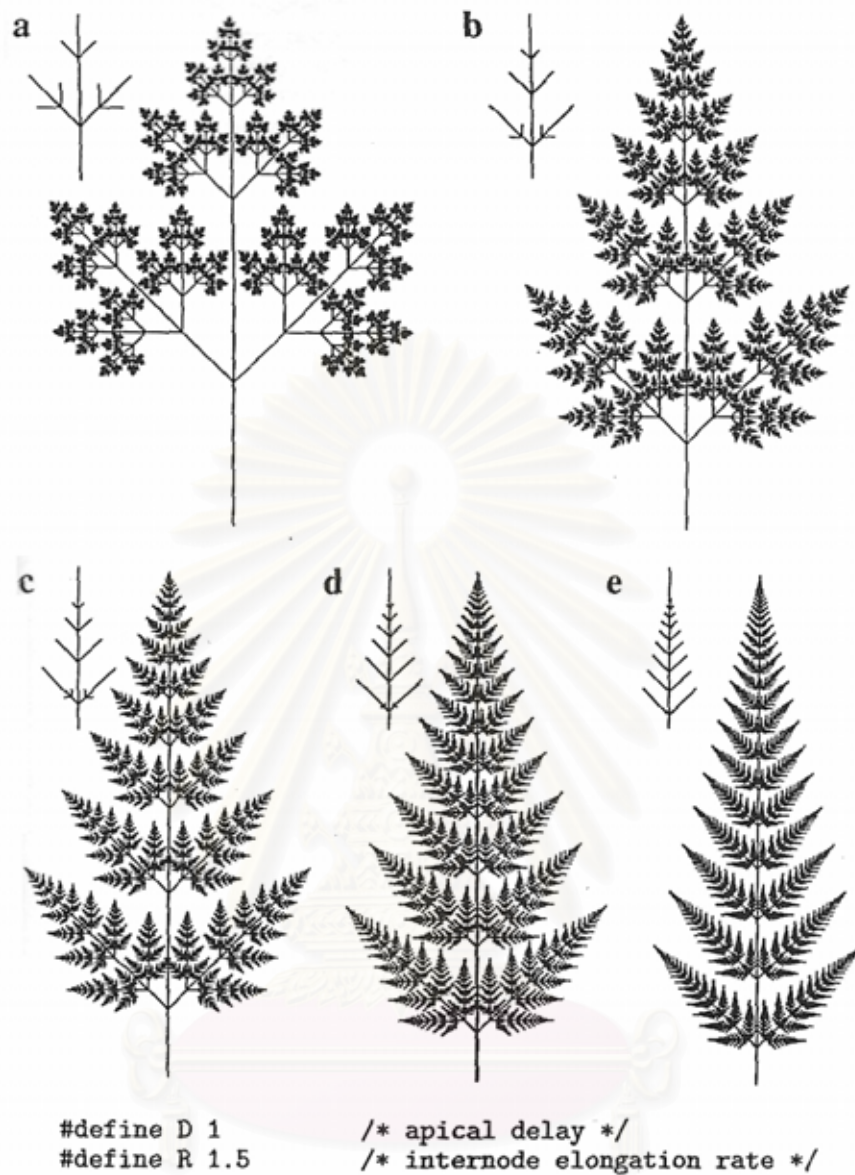


รูปที่ 22 ใบไม้แบบใบเดี่ยวสร้างจาก L-systems

ที่มา: (Przemyslaw Prusinkiewicz and Aristid Lindenmayer 1990:122-123)

2.1.5.5 การสร้างใบไม้ด้วย L-systems แบบใบประกอบ

การสร้างใบประกอบทำได้โดย การสร้างเส้นใบในระดับต่างๆ กัน และใช้วิธีการวนซ้ำเพื่อสร้างรายละเอียดย่อย ใบไม้ที่ได้จะมีรูปทรงคล้ายกัน แต่มีขนาดแตกต่างกัน



รูปที่ 23 ใบไม้แบบใบประกอบสร้างจาก L-systems

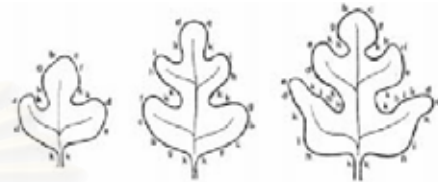
ที่มา: (Przemyslaw Prusinkiewicz and Aristid Lindenmayer 1990:129)

2.1.5.6 L-systems และ Predefined Surface

ในงาน (Prusinkiewicz, Hammel 1991) กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองกลีบดอกไม้โดยใช้ parametric surface พื้นที่ควบคุมโดย จุดควบคุม (control point) ซึ่งปรับเปลี่ยนตำแหน่งเมื่อเวลาผ่านไป ทำให้กลีบดอกไม้มีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการควบคุมตำแหน่งของ จุดควบคุม สามารถประยุกต์ใช้ Parametric L-systems เป็นตัวควบคุมได้ (รูปที่ 24)



รูปที่ 24 แบบจำลองกลีบดอกไม้

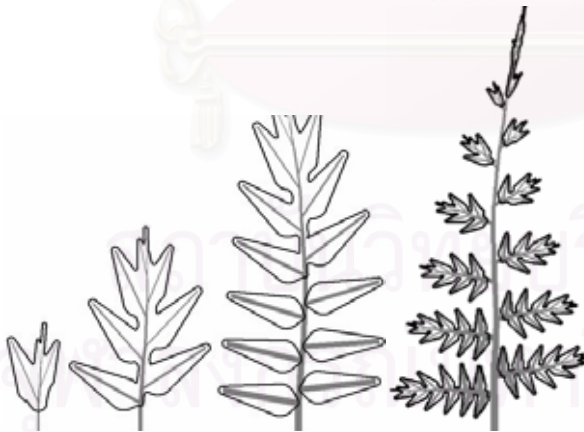


รูปที่ 25 แบบจำลองขอบใบไม้ด้วย L-systems

ที่มา: (Prusinkiewicz, Hammel 1991)

2.1.5.7 L-systems และ Compound Leaves ด้วย Implicit contours

สำหรับแบบจำลองของใบประกอบนำเสนอโดย Rozenberg และ Lindenmayer (Rozenberg, Lindenmayer 1973; Herman, Rozenberg 1975) ประยุกต์ใช้ L-systems สำหรับสร้างขอบของใบไม้ เนื่องจากเป็นการนำเสนอแนวความคิด รูปที่ 25 นั้นจึงเป็นภาพที่วาดด้วยมือ (M. S. Hammel, P. Prusinkiewicz, and B. Wyvill 1992)



รูปที่ 26 ใบไม้แบบใบประกอบสร้างจาก L-systems และ implicit contours



รูปที่ 27 แผนภาพความสูงจาก implicit contours

ที่มา: (Prusinkiewicz, Hammel 1991)

สำหรับในงาน M. S. Hammel, P. Prusinkiewicz, and B. Wyvill 1992 นั้นใช้วิธีสร้างเส้นขอบไปไม้จาก implicit contours รอบเส้นแกน (skeleton) ของกิ่งไม้ (Wyvill et al. 1986; Bloomenthal, Wyvill 1990) วิธีนี้ใช้การสร้างสนามที่มีความสูงรอบเส้นแกนที่กำหนด เส้นขอบกำหนดโดยพื้นที่ที่มีความสูงต่ำค่าหนึ่งที่เท่ากัน ในการกำหนดความสูงต่ำของพื้นที่รอบเส้นแกน มีฟังก์ชันหนึ่งเรียกว่า *field function* $f(x,y)$ โดยการหาค่าความยาว Euclidean distances ของทุกๆ จุดจากเส้นแกน (รูปที่ 27)

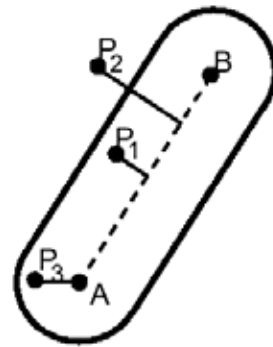
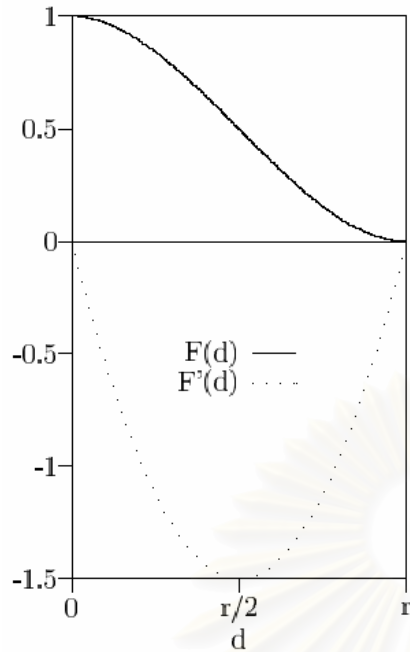
Implicit function

ให้ *field function* $f: \mathcal{R}^2 \rightarrow \mathcal{R}$ สำหรับทุกๆ จุดในระนาบ π และ *implicit contour* คือสมาชิกของทุกๆ จุดใน π ตามเงื่อนไข $f(x,y) = c$ เมื่อ c เป็นค่าคงที่ *threshold value* จุด (x,y) ใดๆ ที่มีค่าน้อยกว่า c อยู่นอก *implicit contour* และ จุด (x,y) ใดๆ ที่มีค่ามากกว่า c อยู่นอก *implicit contour* และสนใจ *field function* ที่ขึ้นอยู่กัเส้นแกน *skeleton* ที่สร้างจาก *skeletal elements* (Bloomenthal, Wyvill 1990) ภายใน π สำหรับในกรณีนี้เส้นแกนดังกล่าวคือโครงสร้างของกิ่ง แต่ละส่วนของเส้นคือรัศมีที่แผ่กระจายออก *radius of influence* ซึ่งขึ้นอยู่กั *field function* ที่มีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างเส้นมากขึ้น และมีค่าเป็นศูนย์เมื่อระยะห่างเท่ากับรัศมี

กำหนดให้สมการสำหรับเส้นรัศมีดังนี้ (สมการนี้เสนอโดย Wyvill et al. 1986)

$$F(d) = \begin{cases} 2\frac{d^3}{r^3} - 3\frac{d^2}{r^2} + 1 & \text{if } 0 \leq d \leq r, \\ 0.0 & \text{if } d \geq r. \end{cases} \quad (2.2)$$

ในสมการนี้ d คือ ระยะห่างระหว่างจุดถึงเส้น และ r คือรัศมีของการแผ่ขยายของเส้น ฟังก์ชันนี้ให้ค่าเท่ากับ 1 บนเส้นตรง(เมื่อ $d=0$) และให้ค่า 0 เมื่อระยะห่าง $d \geq r$ ภายในช่วง $(0,r)$ ค่าของฟังก์ชันลดลงจาก 1 ไปยัง 0 ความชันของฟังก์ชันนี้เท่ากับ 0 เมื่อ $d=0$ และ $d=r$ ภาพตัวอย่างของ *implicit contour* แสดงในรูปที่ 29 ที่กำหนดให้ค่า c มีค่าเท่ากับ 0.5 ระยะห่าง d ไปยังเส้นตรง AB คำนวณจากเส้นตั้งฉากกับ AB (จุด P1,P2) หรือระยะทางที่สั้นที่สุด (จุด P3)



รูปที่ 29 เส้น Implicit contour รอบเส้นตรง AB และจุด ทดสอบ P1,P2,P3

รูปที่ 28 Field Function $F(d)$ and Derivative $F'(d)$

ที่มา: (Prusinkiewicz, Hammel 1991)

สำหรับการคำนวณหาระยะทางของจุดและเส้นคำนวณจาก *total field function*:

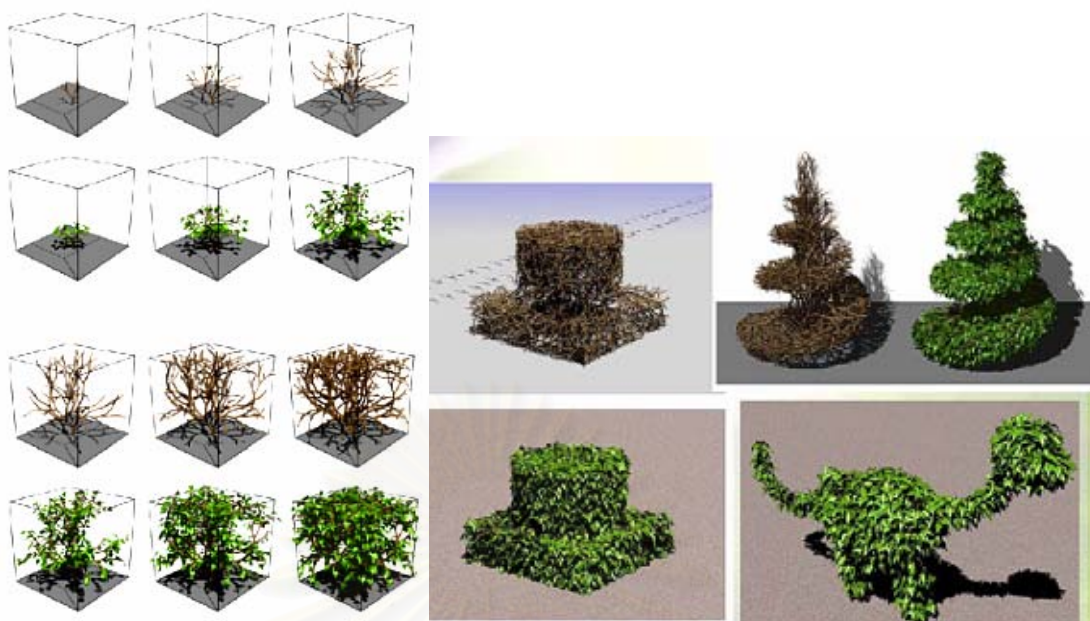
$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n F(d_i(x, y)) \tag{2.3}$$

เมื่อ $d_i(x, y)$ แทนระยะห่างระหว่างจุด $P(x, y)$ และส่วนของเส้นตรงที่ i

เมื่อแทนค่าระยะห่างทั้งหมดจะได้เส้นขอบที่มีระยะห่างจากส่วนของเส้นตรงที่กำหนดไว้ ในลักษณะกำหนดให้เส้นภายในเป็นเส้นของโครงใบไม้ และสร้างแบบจำลองใบไม้แบบใบประกอบได้

2.1.5.8 L-systems และการตัดแต่งทรงพุ่ม (Synthetic Topiary)

ในงานของ P. Prusinkiewicz, M. James and R. Mech ในปี 1994 ได้นำเสนอวิธีการเพื่อการตัดแต่งต้นไม้และส่วนของกิ่งไม้ที่ยื่นออกมา (Pruning) ตามเงื่อนไขที่เพิ่มขึ้นมาภายในระบบของ L-systems กิ่งที่งอกเกินออกจากบริเวณพื้นที่ที่ได้กำหนดไว้จะถูกตัดออกไป ภายหลังจากตัดออกไปแล้วจะปล่อยให้กิ่งใหม่งอกขึ้นมาใหม่ (รูปที่ 30 ซ้าย) เมื่อกิ่งงอกเกินออกมากก็ทำการตัดออกอีกเป็นเช่นนี้เรื่อยไป เมื่อกำหนดให้พื้นที่ภายนอกของพุ่มไม้มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เช่นรูปเกลียว หรือรูปสัตว์ เทคนิคนี้ก็ยิ่งใช้ได้ดี (รูปที่ 30 ขวา)



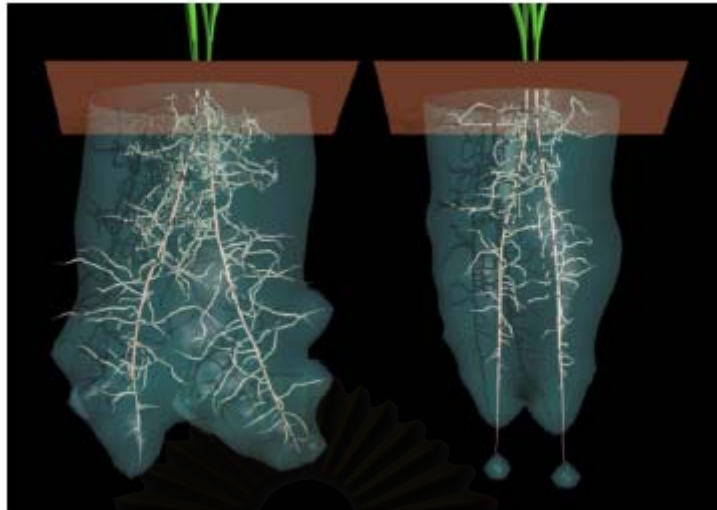
รูปที่ 30 ศิลปะการตัดแต่งกิ่งด้วย L-system

ที่มา: (P. Prusinkiewicz, M. James and R. Mech 1994)

2.1.5.9 L-systems และการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อม

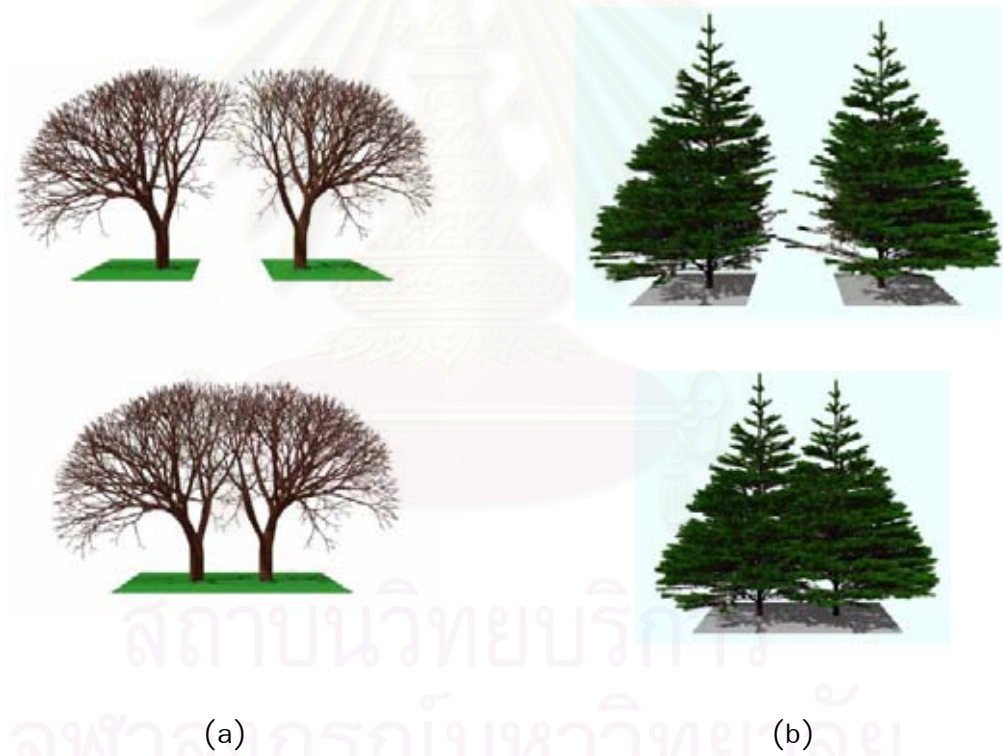
ในงานของ R. Mech and P. Prusinkiewicz (1996) ได้นำเสนอแบบจำลองที่สามารถเจริญเติบโตและแผ่ขยายตามเงื่อนไขของสภาพแวดล้อมที่ได้กำหนดไว้ เช่น ปริมาณแสงที่ได้รับ และ ปริมาณน้ำที่ได้รับ เป็นต้น แบบจำลองดังกล่าวทำงานภายในระบบ L-systems โดยเพิ่มกฎที่เกี่ยวข้องกับตรวจสอบค่าของสภาพแวดล้อมที่ตำแหน่งของกิ่งหลัก เมื่อมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมจึงมีการงอกกิ่งใหม่เกิดขึ้นไปตามทิศทางที่กำหนด ในแบบจำลองของระบบรากทำให้รากมีการงอกที่ห่างออกจากกันเนื่องจากการแข่งขันในการดูดซึมน้ำให้ได้มากที่สุด การที่รากแยกออกจากกันเป็นมุมเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับค่าการแผ่ขยายของรากฝอย ภาพซ้ายแสดงรากฝอยที่เติบโตรวดเร็วกว่าภาพขวา (รูปที่ 31)

ในงานวิจัยเดียวกันนี้ของ R. Mech and P. Prusinkiewicz ได้นำเสนอแบบจำลองของต้นไม้เมื่อมีการแข่งขันกันเพื่อรับแสงสว่างเมื่อเจริญเติบโตใกล้กัน เช่น ต้นไม้ผลัดใบทั่วไปและต้นสน (รูปที่ 32) รูปร่างของทรงพุ่มของต้นไม้จะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับปริมาณแสงที่ได้รับ ในแบบจำลองเดียวกันแต่ตำแหน่งที่อยู่แตกต่างกัน (รูปที่ 33) R. Mech and P. Prusinkiewicz เสนอว่าการสร้างแบบจำลองในลักษณะนี้แสดงถึงความเป็นไปได้ในการจำลองพฤติกรรม การปรับตัวของต้นไม้ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน และใช้สร้างแบบจำลองพืชเพื่อนำมาเกี่ยวข้องกับการออกแบบภูมิทัศน์ได้



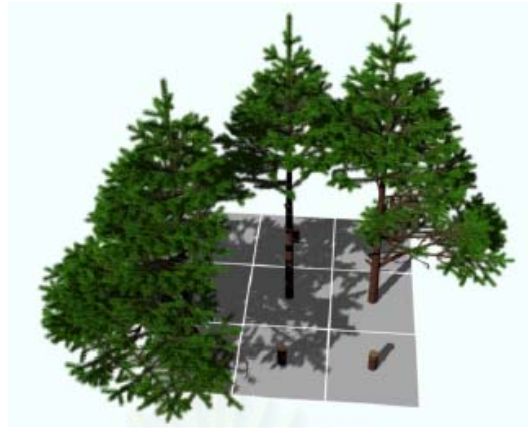
รูปที่ 31 แบบจำลองของระบบราก

ที่มา: (R. Mech and P. Prusinkiewicz 1996)



รูปที่ 32 แบบจำลองของต้นไม้เมื่อมีการแข่งขันเพื่อรับแสง ด้านบนแสดงแบบจำลองที่แยกจากกัน ด้านล่างแสดงแบบจำลองในตำแหน่งปกติ (a) Deciduous Tree (b) Coniferous Tree

ที่มา: (R. Mech and P. Prusinkiewicz 1996)

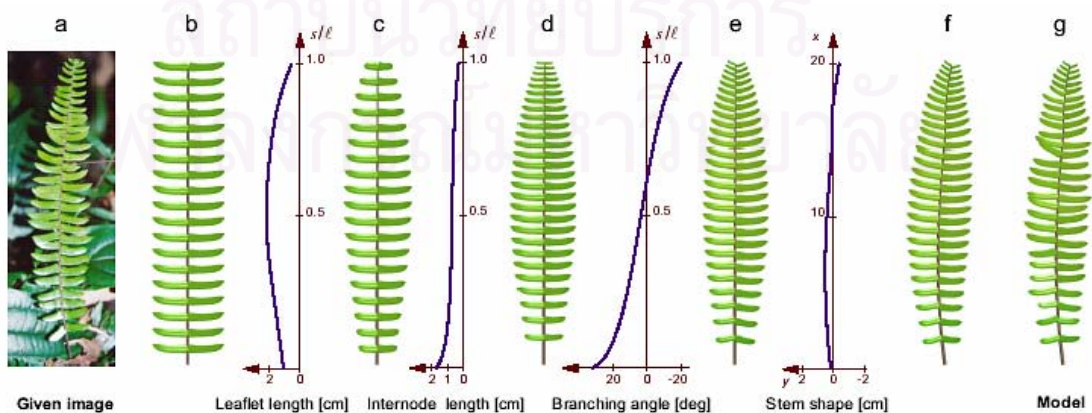


รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ของทรงพุ่มของต้นไม้และตำแหน่งของต้นไม้

ที่มา: (R. Mech and P. Prusinkiewicz 1996)

2.1.5.10 L-systems และการใช้ข้อมูลบอกตำแหน่งสำหรับสร้างแบบจำลองพืช

ในงานของ P. Prusinkiewicz et al. (2001) ได้นำเสนอแบบจำลอง L-systems ที่ใช้การควบคุมโดยการใช้ข้อมูลบอกตำแหน่งเพื่อกำหนดตำแหน่งของฟังก์ชันสำหรับควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ แทนการกำหนดค่าของฟังก์ชันโดยตรง เช่น ความยาวของใบย่อย ส่วนที่อยู่โคนใบจะเริ่มจากตำแหน่งที่ 0 ส่วนกลางใบแทนด้วย 0.5 ส่วนที่อยู่ปลายใบแทนด้วยตำแหน่งที่ 1.0 เป็นต้น เมื่อสร้างแบบจำลองจึงจะใช้ข้อมูลบอกตำแหน่งเพื่อหาค่าฟังก์ชันที่แท้จริง คือ 1, 2 และ 0.5 cm เป็นต้น ตัวอย่างของการควบคุมโดยการใช้ข้อมูลตำแหน่งแสดงไว้ในรูปที่ 34 ภาพถ่ายของใบ *Pellaea Falcata* (sickle fern) ที่ใช้เป็นเป้าหมาย (รูปที่ 34-a) การสร้างแบบจำลองเริ่มต้นจากใบประกอบ (รูปที่ 34-b) เมื่อเส้นรอบรูปของใบเกิดจากความยาวของใบย่อย ทำให้ฟังก์ชันนี้เป็นตัวควบคุมรูปทรงของใบทั้งหมด ตามฟังก์ชันความยาวของใบย่อย (รูปที่ 34-c) ฟังก์ชันต่อมาควบคุมระยะห่างระหว่างใบย่อย (internode) (รูปที่ 34-d) และองศาของใบย่อย (รูปที่ 34-e) ฟังก์ชันต่อมาควบคุมแกนใบหลัก (รูปที่ 34-f) มีการปรับพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงรายละเอียด และได้แบบจำลองคล้ายกับภาพถ่าย (รูปที่ 34-g)



รูปที่ 34 ข้อมูลตำแหน่งสำหรับแบบจำลองของใบ *Pellaea falcata* (sickle fern)

ที่มา: (P. Prusinkiewicz et al. 2001)

2.1.5.11 การเพิ่มความสมจริงของพื้นผิวของแบบจำลองต้นไม้

ในงานของ M. Chover et al. (1995) ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีสำหรับเพิ่มความสมจริงของพื้นผิวกับแบบจำลองต้นไม้ที่สร้างด้วย L-systems ใช้สมการสามมิติสำหรับเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของแบบจำลองให้มีลักษณะบิดเบี้ยวหรือขรุขระสมจริงมากขึ้น ตามสมการ

$$DS(u, v) = S(u, v) + NormalS(u, v) * Turbulence(Sx(u, v), Sy(u, v), Sz(u, v)) * BD \quad (2.4)$$

โดยที่ $DS(u, v)$ คือฟังก์ชันรูปกรวยที่มีการปรับปรุง $S(u, v)$ คือฟังก์ชันรูปกรวย $NormalS(u, v)$ คือเส้นปกติ $Turbulence(x, y, z)$ คือสมการปรับปรุง BD คือปริมาณการบิดเบี้ยวของกิ่งไม้ ในส่วนของการปรับปรุงการบิดเบี้ยวมีสองแบบคือปรับปรุงเฉพาะพื้นผิว และปรับปรุงโครงสร้างหลัก หรือใช้ทั้งสองแบบรวมกันก็ได้ และขั้นตอนวิธีนี้สามารถใช้สร้างพื้นผิวที่มีรายละเอียดมากๆ ได้



รูปที่ 35 ต้นไม้ปกติ



รูปที่ 36 ต้นไม้เพิ่มความบิดเบี้ยวของพื้นผิว



รูปที่ 37 ต้นไม้เพิ่มความบิดเบี้ยวของพื้นผิวและโครงสร้างหลัก

ที่มา: (M. Chover et al. 1995)

2.2 แบบจำลองเน้นพื้นที่

2.2.1 Reaction-Diffusion pattern models

ในแบบจำลองนี้เป็นผลมาจากการตอบสนองระหว่างสารอย่างน้อยสองชนิดที่กระจายอยู่และทำปฏิกิริยาต่อกัน เมื่อเกิดปฏิกิริยาต่อกันแล้วสามารถแสดงโดยใช้สีเพื่อสร้างเป็นลวดลายได้ แบบจำลอง Reaction-Diffusion ถูกพัฒนาขึ้นโดย Turing เมื่อปี 1952 จากนั้นได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในหลายด้าน รวมทั้งสิ่งมีชีวิต เช่นลวดลายของเปลือกหอย (Fowler et al. 1992) เป็นต้น

2.2.2 Diffusion-Limited accretive growth

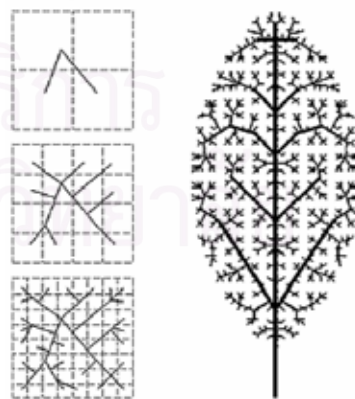
จากแบบจำลองของ Reaction-Diffusion ได้พัฒนาต่อมาเรียกว่า accretive growth โดยเกิดขึ้นรอบๆ โครงสร้างแกนของตัวนำ (medium) ด้วยวิธีนี้ Kaandrop ใช้สร้างแบบจำลองสามมิติของฟองน้ำ sponge *Haliclona oculata* ถูกอ้างอิงถึงภายในงานตีพิมพ์ของ P. Prusinkiewicz 1993

2.2.3 Meinhardt's Model และ Gottlieb's Model

Meinhardt's Model เป็นแบบจำลองใบไม้ที่เกิดขึ้นบน Hexagon Grid โดยใช้แบบจำลองของ Reaction-Diffusion (รูปที่ 38) ส่วน Gottlieb's Model เป็นแบบจำลองใบไม้ที่เกิดจากการแบ่งพื้นที่ออกเป็นส่วนย่อยๆ ในตารางสี่เหลี่ยม เมื่อแบ่งย่อยลงไปแล้วหากยังไม่มีเส้นเชื่อมไปถึงก็จะให้มีเส้นเชื่อมไปยังพื้นที่นั้นด้วย (รูปที่ 39) งานทั้งสองนี้ถูกอ้างอิงถึงภายในงานตีพิมพ์ของ P. Prusinkiewicz 1993



รูปที่ 38 แบบจำลองของ Meinhardt



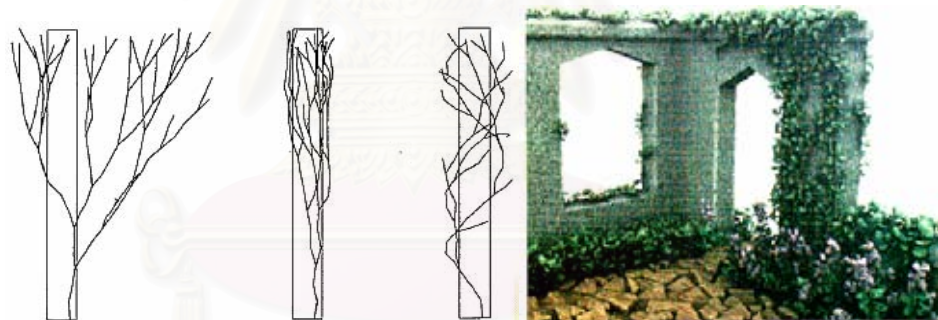
รูปที่ 39 แบบจำลองของ Gottlieb

2.2.4 Cellular Automata

ใน Cellular Automata พื้นที่ถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ ไม่ต่อเนื่องกันบนตาราง แต่ละพื้นที่หรือเซลล์จะถูกเลือกให้มีค่าของสถานะใดสถานะหนึ่ง ในเซตของสถานะทั้งหมด เมื่อเวลาผ่านไปแต่ละเซลล์จะมีการเปลี่ยนสถานะภายใต้กฎเดียวกัน โดยมีเงื่อนไขจากสถานะของเซลล์ปัจจุบันและสถานะของเซลล์รอบๆ Cellular Automata ถูกนำมาใช้งานได้หลายอย่างในเชิงของพืชตัวอย่างเช่น การแผ่ขยายออกไปยังพื้นที่ข้างๆ เลียนแบบการแตกของกิ่งไม้ หรือแบบจำลองของการเกิดตะไคร่น้ำ เป็นต้น

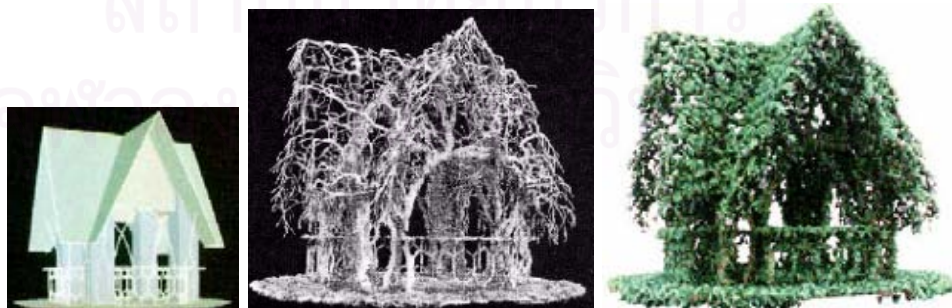
2.2.5 Voxel-Space Automata

ใน Voxel-Space Automata กำหนดให้พื้นที่ของ Cellular นั้นขยายออกเป็นสามมิติ ในงานของ Greene (N. Greene 1989) ใช้สร้างพืชที่เลื้อยได้ไปบน Voxel ที่กำหนดไว้ ซึ่งในงานของ Greene กำหนดให้ Voxel ล้อมรอบบริเวณผาผนังของตัวอาคาร นอกจากนั้น Greene ยังคำนวณทิศทางและปริมาณแสงที่ Voxel ได้รับ เมื่อได้รับแสงปริมาณพอเหมาะพืชจึงจะงอกไปยังบริเวณนั้น และคำนวณขนาดของลำต้นหลังจากที่พืชเลื้อยปกคลุมทั่วแล้ว ขนาดของลำต้นขึ้นอยู่กับจำนวนกิ่งที่แผ่ขยายออกไป (รูปที่ 40 และ รูปที่ 41)



การงอกของไม้เลื้อยรอบบริเวณที่กำหนด (ซ้าย) ไม้เลื้อยขึ้นในเฉพาะบริเวณที่ได้รับแสง (ขวา)

รูปที่ 40 แบบจำลองพืชจาก Voxel-Space Automata

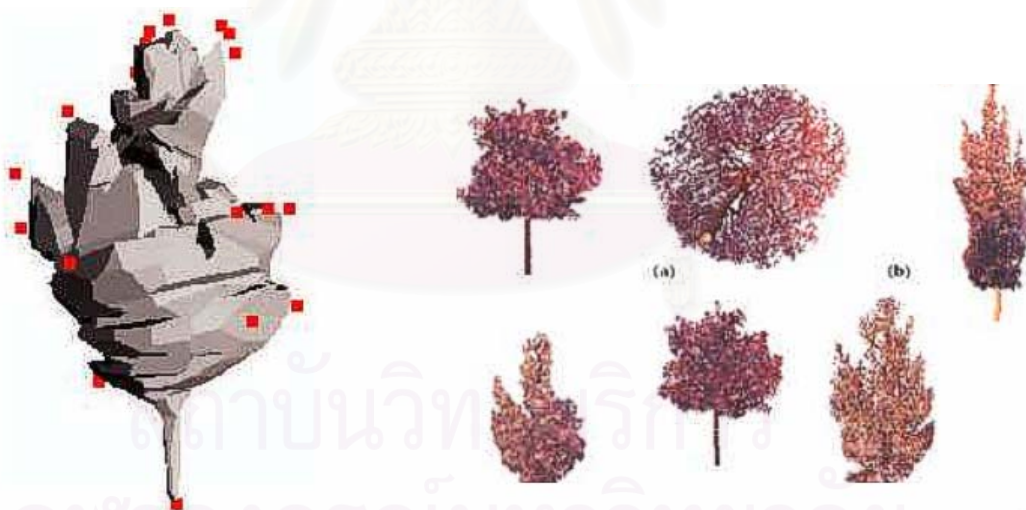


แบบจำลองอาคาร (ซ้าย) แบบจำลองลำต้น (กลาง) และใบปกคลุมอาคาร (ขวา)

รูปที่ 41 แบบจำลองพืชจาก Voxel-Space Automata

2.2.6 Medial-Axis

ในงานของ I. Shlyakhter et al. (2001) นำเสนอวิธีสำหรับสร้างต้นไม้จากภาพถ่ายที่ถ่ายจากหลายมุมมอง และสร้างแบบจำลองจากรูปร่างของต้นไม้ โดยในขั้นแรกได้นำภาพถ่ายของต้นไม้ที่ต้องการจากหลายๆ มุมมาทำการหาขอบของส่วนต้นไม้แยกจากฉากหลัง ในขั้นต่อมานำภาพเหล่านั้นมาประกอบเป็นแบบจำลองสามมิติ และสร้างเส้นรอบรูปแบบสามมิติ (convex hull) เพื่อกำหนดขอบเขตของต้นไม้ เมื่อได้ขอบเขตของต้นไม้แล้วในขั้นตอนต่อมาใช้เทคนิคที่ใช้หาแกนกลาง (Medial-Axis) ของรูปทรงใดๆ เพื่อสร้างแกนหลังของกิ่งไม้ให้กับแบบจำลอง จากนั้นใช้ L-systems เพื่อให้กิ่งเหล่านั้นงอกจากแกนเดิม โดยมีกิ่งย่อยและใบไม้รวมอยู่ด้วย และคำนวณหาค่าความหนาจากกิ่งที่งอกออกมาใหม่ เมื่อได้ค่าความหนาของกิ่งแล้วจึงสร้างเป็นแบบจำลองสามมิติ (รูปที่ 42) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่นที่ใช้ภาพหลายมุมมอง คืองานของ T. Sakaguchi and J. Ohya 1999 ใช้ภาพหลายมุมมองสร้างจุดพิกัดเพื่อสร้างโครงสร้างของกิ่งไม้ และแบบจำลองที่ได้มีการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมเช่นแรงลมเป็นต้น



รูปที่ 42 ภาพต้นไม้สร้างจากภาพถ่ายหลายมุมมอง

2.3 แบบจำลองพีชแบบอื่นๆ

2.3.1 Particle Systems

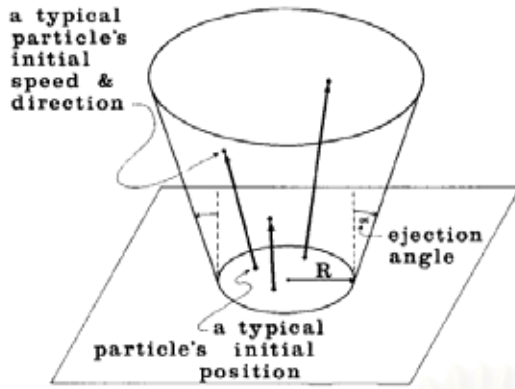
ในปี ค.ศ. 1983 และ ค.ศ. 1985 (W. T. Reeves 1983, W. T. Reeves 1985) การสร้างแบบจำลองของ W.T.Reeves ได้นำระบบ Particle Systems มาประยุกต์ใช้ Reeves ได้นำเสนอแนวคิดในการสร้างแบบจำลองของการระเบิด ดอกไม้ไฟ (รูปที่ 43) และ ต้นหญ้า (รูปที่ 44) ซึ่ง Particle แต่ละตัวนั้นประกอบด้วยคุณสมบัติดังนี้

- ตำแหน่ง (Position)
- ความเร็วและทิศทาง (Velocity speed and direction)
- ขนาด (Size)
- สี (Color)
- ความโปร่งแสง (Transparency)
- รูปทรง (Shape)
- ระยะเวลา (Lifetime)

ระบบ Particle Systems ให้ความไม่แน่นอน (Chaotic) ในการสร้างรูปแบบการเคลื่อนที่ ในตอนเริ่มต้น ค่าความเร็วกำหนดให้มีค่าสุ่มอยู่ในช่วงที่กำหนดแน่นอน Particle แต่ละตัวจะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางที่ได้กำหนดไว้ในตอนแรก เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดไว้ Particle ก็จะหายไป



รูปที่ 43 การระเบิด (ซ้าย) กำแพงไฟ (กลาง) ดอกไม้ไฟ (ขวา)



รูปที่ 44 ทิศทางและมุมของ Particle (ซ้าย) ต้นหญ้าจาก Particle Systems (ขวา)

การสร้างแบบจำลองของต้นหญ้า ส่วนของลำต้นสร้างจากทิศทางการเคลื่อนที่ของ Particle แต่ละตัว เช่นเดียวกับภาพกำแพงไฟ และภาพดอกไม้ไฟ ต่อมาในปี ค.ศ. 1985 W. T. Reeves นำเสนอการประยุกต์ใช้ particle systems เพื่อกระจายตำแหน่งของต้นไม้สำหรับสร้างแบบจำลองของป่า

2.3.2 Origami

งานของ K. Kaino et al. (K. Kaino 1994, K. Kaino et al. 2000) เป็นแบบจำลองของใบไม้ที่น่าสนใจ เนื่องจากใช้แนวคิดของการพับกระดาษ (Origami) มาใช้สร้างแบบจำลอง ได้ใช้คอมพิวเตอร์กราฟิกจำลองแบบจำลองของกระดาษที่พับและคลี่ได้ เส้นใบหลักของใบไม้ นั้นแทนด้วยการพับให้เป็นสันหูน ซึ่งเมื่อคลี่ออกมาก็จะเสมือนกับใบไม้ที่กำลังคลี่ใบออกมา (รูปที่ 45)



รูปที่ 45 ใบไม้แบบพับกระดาษ

2.3.3 แบบจำลองพืชทางพฤกษศาสตร์

2.3.3.1 ฮอร์โมนพืช

การนำแบบจำลองอ้างอิงทางพฤกษศาสตร์มาใช้ ดังเช่นการจำลองฮอร์โมนเพื่อควบคุมการเติบโตของกิ่งและสภาพแวดล้อม ในงานของ Chiba et al. (N. Chiba, , S. Ohkawa, K. Muraoka and M. Miura 1994) และ (N. Chiba, K. Ohshida, K. Muraoka, M. Miura and N.

Saito 1994) และ การสร้างแบบจำลองการเคลื่อนไหวของพืช (N. Chiba. et al. 1993) ใน งานวิจัยทั้งสองได้แสดงถึงโครงสร้างของต้นไม้แบบต่างๆ ที่มีผลกระทบจากฮอร์โมนพืช (Plant Hormone) ที่เป็นปัจจัยหนึ่งที่ควบคุมให้ตา (bud) บางส่วนทำงานหรืออยู่ในระยะพักตัว (Dormancy Break) การแตกกิ่งก้านโดยการควบคุมนี้ทำให้เมื่อต้นไม้มีการแตกกิ่งก้านใหม่จะ ยังคงสามารถรักษาลักษณะเฉพาะของทรงพุ่มของต้นไม้เดิมไว้ได้ ในแบบจำลองได้แสดงถึงอีก ปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของพืชนั่นก็คือแสงที่มีส่วนทำให้กิ่งแตกและแผ่กระจาย ออกโดยรอบต้นไม้ตามการเคลื่อนไหว (movement) ของพืชที่ตอบสนองต่อทิศทางของ แสงอาทิตย์ (Heliotropism)

2.3.3.2 สีของใบไม้และการจัดเรียงของใบไม้

แบบจำลองใบไม้ในงานของ Chiba et al. (N. Chiba, K. Ohshida, K. Muraoka and N. Saito 1996) มีพารามิเตอร์เกี่ยวข้องอยู่สองประการ กล่าวคือ การจัดเรียงทิศทางใบไม้ (Leaf arrangement) นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณและทิศทางของแสงที่ได้รับและการเปลี่ยนสีของใบไม้ นั้น ขึ้นกับอายุของใบ (ageing process) การจัดเรียงใบไม้แบ่งย่อยออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ จัดเรียงใบไม้ตามกฎ Phyllotaxy และจากนั้นจึงจัดเรียงทิศทางของใบให้หันไปตามทิศทางโดย คำนึงถึงปริมาณและทิศทางของแสงที่ได้รับ ทำให้ตำแหน่งของใบไม้ในแบบจำลองดูสมจริง ส่วนการเปลี่ยนสีของใบไม้ นั้นขึ้นอยู่กับสารสี (pigment) ภายในใบ สีเขียวเกิดจากสารที่ เรียกว่า *Chlorophyll* สีแดงเกิดจากสารที่เรียกว่า *Anthocyanin* และมีรงควัตถุอีกชนิดหนึ่ง เรียกว่า *Carotenoid* ผลสมอยู่ เมื่อเวลาผ่านไปสารสีเขียวจะลดลงตามลำดับ ในขณะที่สารสีแดง จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามลำดับ ทำให้ใบไม้เปลี่ยนสีจากสีเขียวเหลืองไปเป็นสีแดงในที่สุด

2.3.3.3 การเรียงใบ (Phyllotaxis)

คำว่า Phyllotaxis มีความหมายถึงการศึกษาเกี่ยวกับการจัดเรียงของใบ รากศัพท์ของ Phyllotaxis มาจากคำในภาษากรีก *phullon* มีความหมายว่าใบไม้ (leaf) และ *taxis* หมายถึง การจัดเรียง (arrangement) (Roger V. Jean 1994:3) การจัดเรียงของใบไม้มีรูปแบบการ หมุนรอบแกน ซึ่งเป็นลักษณะหนึ่งที่ได้พบได้อย่างเด่นชัดในพืช เช่น ตำแหน่งของใบไม้ การจัดเรียงของกลีบดอก เป็นต้น มีผู้สังเกตพบว่า Phyllotaxis มีลักษณะเกี่ยวข้องกับลำดับ Fibonacci และอัตราส่วนทอง (Golden Ratio) ดังนั้นก่อนที่จะกล่าวถึง Phyllotaxis จึงขออธิบาย ถึงลำดับ Fibonacci ก่อน

ความสัมพันธ์เวียนเกิดของตัวเลขฟีโบนัชชี (Fibonacci Numbers)

เพื่อให้เห็นภาพของตัวเลขฟีโบนัชชี จะใช้ตัวเลขตัวเลขฟีโบนัชชีอธิบายธรรมชาติอย่างหนึ่ง ลำดับนี้เริ่มขึ้นจากปัญหากระต่ายคู่หนึ่ง กระต่ายที่มีอายุ 2 เดือนขึ้นไปจะทำให้กำเนิดกระต่ายอีก

1 คู่ เมื่อเวลาผ่านไป n เดือนจะมีกระต่ายกี่คู่ สมมติว่ากระต่ายไม่ตายเลย (สมชาย ประสิทธิ์จูตระกูล 2544:112)

ตาราง 1 จำนวนกระต่าย

เดือนที่	ลูกกระต่าย (คู่)	กระต่ายอายุ 2 เดือน หรือมากกว่า (คู่)	รวม (คู่)
1	1	0	1
2	0	1	1
3	1	1	2
4	1	2	3
5	2	3	5
6	3	5	8
7	5	8	13
8	8	13	21
9

สังเกตว่าจำนวนคู่ของกระต่ายจะมีค่าเท่ากับจำนวนคู่ของกระต่ายเดือนที่แล้วรวมกับจำนวนคู่ของกระต่ายสองเดือนที่แล้ว ดังนั้น ให้ F_n แทนจำนวนกระต่าย เมื่อเวลาผ่านไป n เดือน

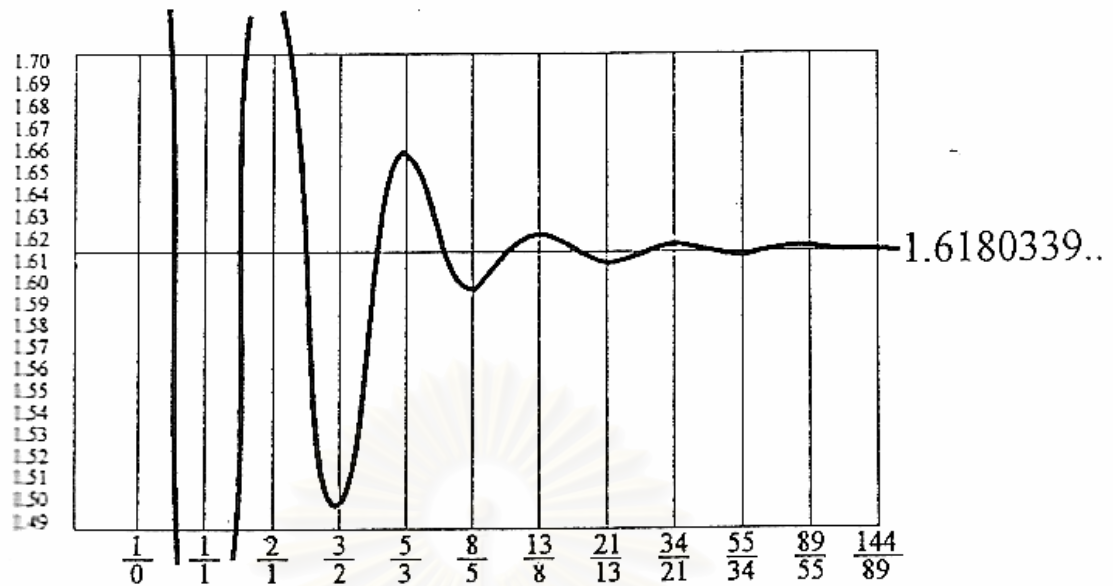
$$F_n = F_{n-1} + F_{n-2} \quad \text{สำหรับ } n > 1, F_0 = 0, F_1 = 1 \quad (2.5)$$

จากสมการดังกล่าวแสดงลำดับฟีโบนัชชี

<1,1,2,3,5,8,13,21,34,55,89,144,233,377,610...>

ค่าเฉลี่ยทอง (The Golden Mean)

เมื่อนำตัวเลขในลำดับฟีโบนัชชี n หารด้วย ลำดับฟีโบนัชชี $n-1$ หรือ F_n / F_{n-1} จะได้เลขทศนิยมค่าหนึ่ง เมื่อลำดับนี้มากขึ้น ได้อัตราส่วนมีค่าเข้าใกล้ 1.61803398875.. (รูปที่ 46)



รูปที่ 46 อัตราส่วนตัวเลขในลำดับฟีโบนัชชี

ตัวเลขฟีโบนัชชีและอัตราส่วนนี้ (รูปที่ 47) พบว่าปรากฏอยู่ในพืช, เปลือกหอย, กาแลคซีกันหอย, ร่างกายของมนุษย์ หรือสิ่งอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับธรรมชาติ (Michael S. Schneider 1994:116-121)

Whole	
ϕ (Phi)	1
Large part	Small part

รูปที่ 47 แผนภาพอัตราส่วน ϕ

$$\text{Whole} / \text{Large part} = \text{Large part} / \text{Small part} = \phi \text{ (Phi)} = 1.61803398875.. \quad (2.6)$$

อัตราส่วนทอง (The Golden Ratio)

อัตราส่วนทองกำหนดให้ใช้สัญลักษณ์ ϕ (Phi) หรือบางที่ใช้ τ (Tau) มีค่าเท่ากับ

$$\phi = \frac{(\sqrt{5}+1)}{2} \quad (2.7)$$

หรือกำหนดให้เส้นตรงเส้นหนึ่งมีค่า 1 หน่วย (Whole) เมื่อแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนหนึ่งยาว x หน่วย (Large part) และอีกส่วนหนึ่งยาว $(1-x)$ หน่วย (Small part)

$$\frac{x}{(1-x)} = \frac{1}{x} \quad (2.8)$$

$$x = \frac{(\sqrt{5}-1)}{2} = \frac{1}{\phi} \quad (2.9)$$

$$\frac{1}{x} = \phi \quad (2.10)$$

เมื่อนำอัตราส่วนดังกล่าวมาใช้แบ่งมุม

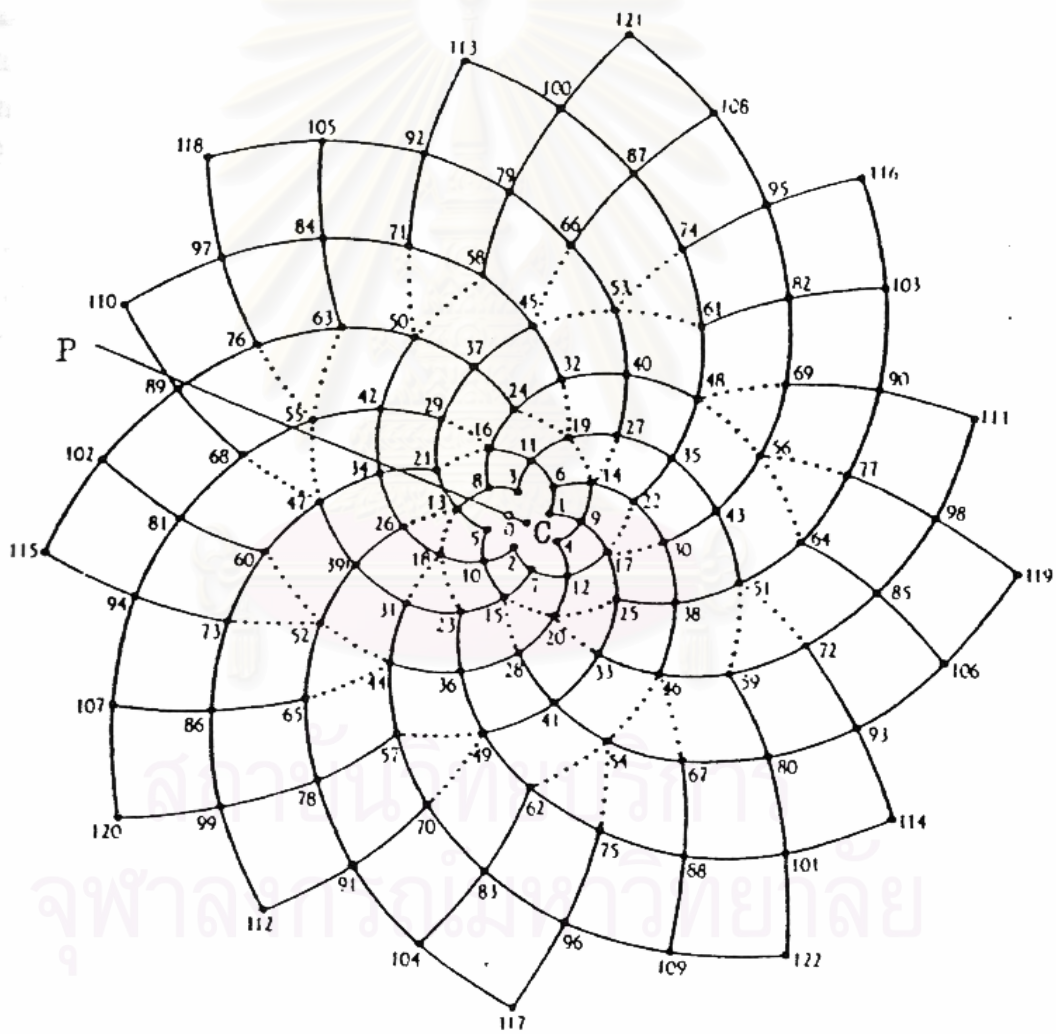
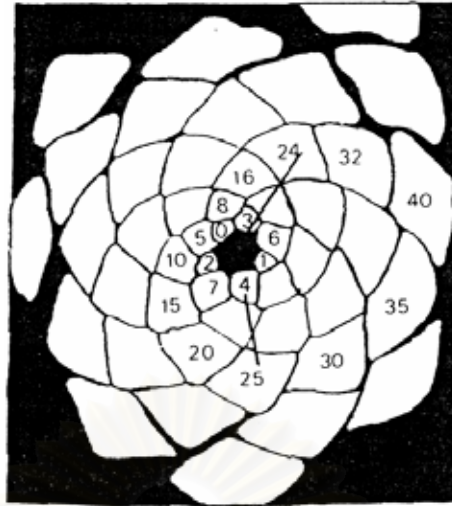
$$360^\circ \left(1 - \frac{1}{\phi}\right) = 360^\circ (2 - \phi) = 360^\circ \tau^{-2} \approx 137 \frac{1}{2}^\circ \quad (2.11)$$

ค่ามุมโดยประมาณ $137 \frac{1}{2}^\circ$ และค่าประมาณ $\left(1 - \frac{1}{\phi}\right) \approx 0.381$ เรียกว่ามุมฟีโบนัคซี (Fibonacci angle)

แผนภาพรูปเวียน Spiral Pattern

ในการสร้างรูปเวียนพบว่ามมุมกาง (divergence angle) ที่แน่นอนค่าหนึ่งซึ่งมีค่าน้อยกว่า 180° เช่น $2/5$ หรือ $144^\circ = (2/5 * 360^\circ)$ สำหรับในธรรมชาตินั้นมีแนวโน้มว่าค่าของมุมประมาณ 137.5° วัดได้จากตำแหน่งที่ 24-25 (รูปที่ 48 บน) เมื่อลากเส้นตรง PC เกิดปรากฏการณ์ Rising phyllotaxis เนื่องจากเส้นตรง PC ผ่านตำแหน่งที่ 8,13,21,34,55,89 ซึ่งเป็นลำดับของฟีโบนัคซี (รูปที่ 48 ล่าง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

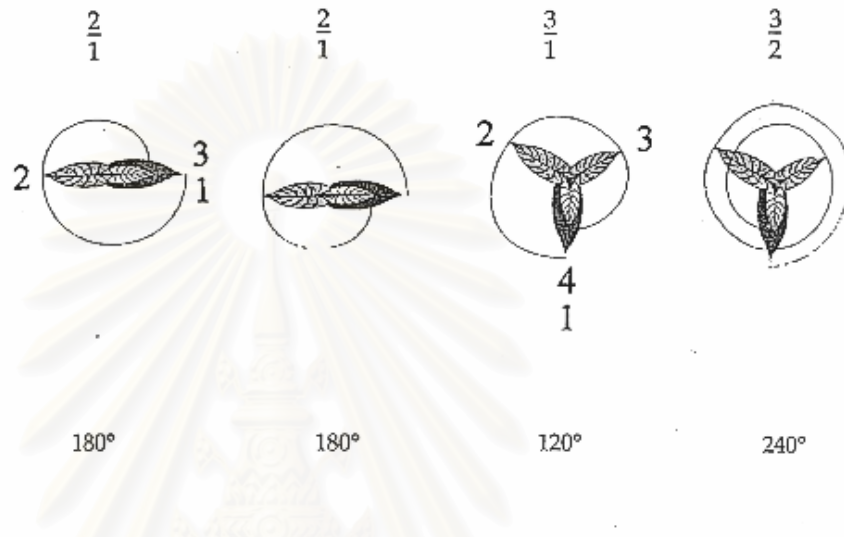


รูปที่ 48 ภาพตัดขวางรูปเวียนของโคน (cone) ของ *Pinus pinea* (บน) Fibonacci Angle (ล่าง)

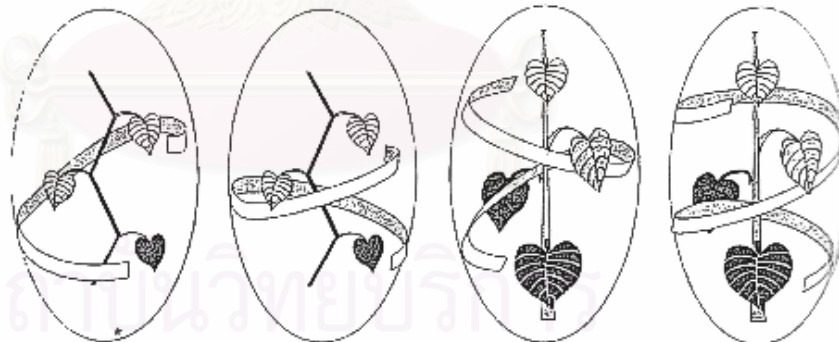
ที่มา: (Roger V. Jean 1994:15,17)

สำหรับการจัดเรียงของใบไม้ในธรรมชาติ นอกจากมุม 137.5° แล้วสามารถพบมุมที่มีค่าต่างๆ กันได้ เช่น 180° , 120° , 240° , 144° , 216° , 135° และ 225° (รูปที่ 49 และ รูปที่ 50) การหมุนอาจจะทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกา อัตราส่วนเช่น $2/1$, $8/3$ คือจำนวนของใบไม้และจำนวนรอบ เช่น $2/1$ มีใบไม้ 2 ใบและมีจำนวน 1 รอบ, $8/3$ มีใบไม้ 8 และมีจำนวน 3 รอบ เมื่อนำอัตราส่วนกลับคูณด้วย 360° จะได้ค่ามุม เช่น $3/8 * 360^\circ = 135^\circ$

Fibonacci fraction
of
leaves
spirals



Leaf
arrangement:
Plant as
spiraling
field

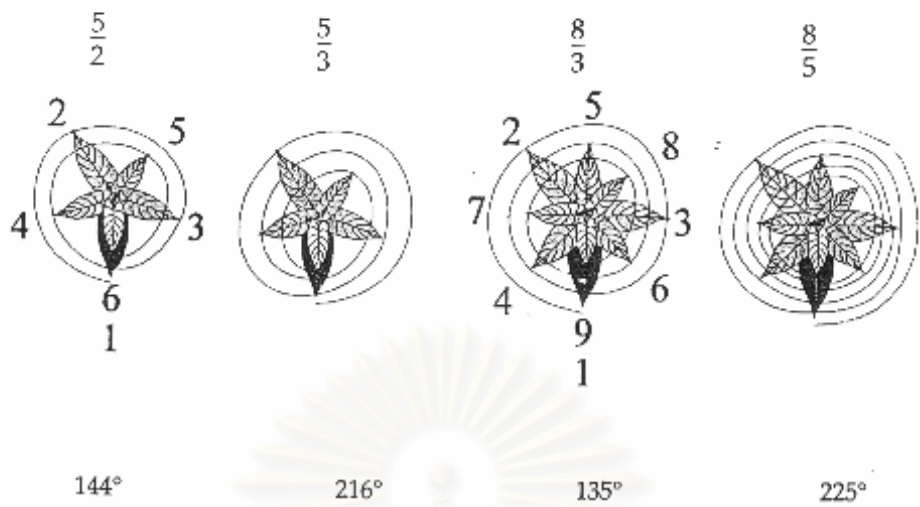


Grasses, rice, corn, wheat,
sugar, bamboo, ferns, palm
fronds, lime, ivy, elm, bass-
wood, linden, ash, horse
chestnut, sycamore, maple,
dogwood

Beech, hazel, potato "eyes"

รูปที่ 49 การจัดเรียงใบไม้รูปเวียน

ที่มา: (Michael S. Schneider 1994:170-171)



Apple, cherry, apricot, oak, cypress, poplar

Holly, pear, spruce, various beans

รูปที่ 50 การจัดเรียงใบไม้รูปเวียน

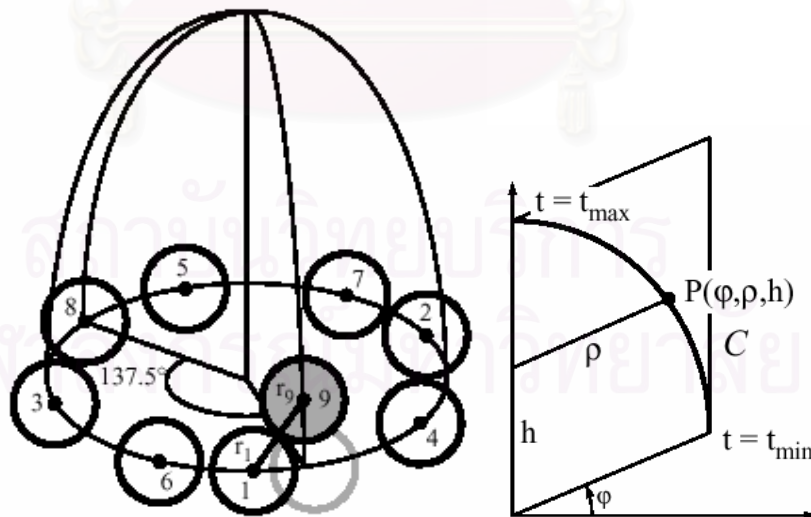
ที่มา: (Michael S. Schneider 1994:170-171)

แบบจำลองรูปเวียน (Collision-based model of phyllotaxis)

ได้มีการนำแบบจำลองรูปเวียนมาใช้สร้างแบบจำลองของดอกไม้ และต้นกระบองเพชร (D. R. Fowler et al. 1989, D. R. Fowler et al. 1992) รูปที่ 51 แสดงการพัฒนาของตาดอก (floral bud) ของ *Microseris pygmaea* ซึ่งเป็นพืชที่มีลักษณะคล้าย dandelion และมีลักษณะของช่อดอกแบบช่อกระจุกแน่น (capitulum) ปุ่มที่มีหมายเลขกำกับคือกลุ่มเนื้อเยื่อเจริญของพืช (primordia) ซึ่งจะพัฒนาเป็นดอกย่อย (florets) กลุ่มเนื้อเยื่อเจริญนี้ติดอยู่บนส่วนปลายสุดของก้านช่อดอก เรียกว่าฐานดอก (receptacle) หมายเลขแสดงลำดับของปุ่มที่เกิดขึ้น ลำดับที่ 1 เกิดก่อนและอยู่ด้านล่าง และเกิดปุ่มอื่นๆ ไล่เรียงขึ้นมาตามลำดับ มุมระหว่างปุ่มมีค่าประมาณ 137.5°



รูปที่ 51 ภาพถ่ายของ *Microseris pygmaea* ตัวเลขแสดงลำดับการเกิดของ primordia และแถบแสดงระยะ $50\mu\text{m}$



รูปที่ 52 แบบจำลองการจัดเรียงตำแหน่งรูปเวียน (ซ้าย) ตำแหน่งถูกจัดวางตามลำดับด้วยค่ามุม 137.5 และจัดให้อยู่ในตำแหน่ง กรณีที่วางไม่ได้ตำแหน่งจะเลื่อนขึ้นตามเส้นโค้ง (ขวา) เพื่อให้ซ้อนทับกันพอดี ในภาพแสดงตำแหน่งที่ 9 กับตำแหน่งที่ 1

ที่มา: (D. R. Fowler et al. 1992)

ในการคำนวณหาตำแหน่งเพื่อจัดวางได้อย่างเหมาะสม กำหนดให้แบบจำลองอยู่ในระบบแกนเชิงมุม (cylindrical coordinate) ประกอบด้วย φ, p, h ระบบจำลองการหมุนของเส้นโค้ง (Bezier Curve) $C(\varphi=0, p(t), h(t))$ รอบแกน h (รูปที่ 52) พารามิเตอร์ t มีค่าอยู่ในช่วง t_{\min} , ฐาน ถึง t_{\max} , จุดปลายบนสุด ดังนั้นจุด P สามารถแทนได้ด้วยค่าตัวเลขสองจำนวนคือ $\varphi \in [0, 360)$ และ $t \in [t_{\min}, t_{\max}]$ กำหนดให้รัศมีของปุ่ม $\{r_0, r_1, r_2, \dots\}$ ตามลำดับ รูปแบบที่สร้างด้วยแบบจำลองนี้แทนด้วยสมการวนซ้ำ

$$\begin{cases} \varphi_0 = 0, \\ t_0 = t_{\min}, \\ \\ \varphi_{n+1} = \varphi_n + 137.5^\circ = (n+1) \cdot 137.5^\circ, \\ t_{n+1} = \min\{t \in [t_{\min}, t_{\max}] : (\forall i = 0, 1, \dots, n) \\ \quad \|P(\varphi_i, t_i) - P(\varphi_{n+1}, t)\| \geq r_i + r_{n+1}\}. \end{cases} \quad (2.12)$$

เทอม $\|P(\varphi_i, t_i) - P(\varphi_{n+1}, t)\|$ หมายถึงระยะห่าง Euclidean ระหว่างจุด $(\varphi_i, p(t_i), h(t_i))$ และ $(\varphi_{n+1}, p(t), h(t))$ สูตรคำนวณสำหรับ t_{n+1} เป็นค่าพารามิเตอร์ของ t ที่น้อยที่สุด สำหรับศูนย์กลางของตำแหน่งใหม่ $P(\varphi_{n+1}, t)$ ระยะห่างอย่างน้อย $r_i + r_{n+1}$ จากศูนย์กลางของตำแหน่งเดิม $P(\varphi_i, t)$ ใดๆ ส่วนมุม φ_{n+1} ที่ตำแหน่งใหม่บวกด้วยค่าคงที่ $(n+1) \cdot 137.5^\circ$

ในทางปฏิบัติ ค่าของ t_{n+1} ถูกคำนวณโดยใช้วิธี binary search ในช่วง $[t_{\min}, t_{\max}]$ และหยุดเมื่อค่า $t \in [t_{\min}, t_{\max}]$ อยู่ในช่วงที่กำหนด

$$(\forall i = 0, 1, \dots, n) \|P(\varphi_i, t_i) - P(\varphi_{n+1}, t)\| \geq r_i + r_{n+1} \quad (2.13)$$

เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าของ t_{n+1} มีประโยชน์เมื่อปุ่มที่เกิดขึ้นทีหลังมีขนาดเล็กลง $\{r_0 > r_1 > r_2, \dots\}$ ในกรณีนี้ตำแหน่งของปุ่มขนาดเล็กควรอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับจุดปลายด้านบนแต่อาจเลื่อนลงมาปิดช่องว่างระหว่างปุ่มขนาดใหญ่ด้านล่างแทน กรณีที่ไม่ต้องการนี้ทำให้ทำลายลักษณะโครงสร้างที่ควรจะเป็นของรูปเวียน สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการกำหนดขอบเขตจำกัดของค่าพารามิเตอร์ t ด้วยค่าประมาณจากฮิวริสติก σ สำหรับ t_{n+1} จาก t_{\min} เป็น $t_{\min}' = \max\{t_{\min}, t_n - \sigma\}$ และพบว่าเมื่อ σ มีค่าประมาณรัศมีของปุ่มที่เกิดขึ้นใหม่ที่น้อยที่สุดใช้ได้ทุกกรณี

รูปที่ 53 ซ้าย แสดงผลจากแบบจำลอง Green cornflower (*Rudbeckia laciniata*) ซ่อดอกประกอบด้วยดอกย่อยสามแบบ คือ ray florets, open disk florets และ close disk florets ส่วนรูปที่ 53 กลางแสดงแบบจำลองลักษณะรูปเกลียวแบนของดอกไม้แบบผสม แบบจำลองนี้

ใช้ได้กับลักษณะของพืชได้หลายชนิดเช่น *Mammillaria spinosissima*, goatsbeard (*Tragopogon dubius*), cauliflowers, broccoli, Raspberry, button bush (*Cephalanthus occidentalis*), Grape hyacinths, water smartweed และแบบจำลองรูปเวียนนี้ใช้ได้กับการจัดเรียงตำแหน่งของดอกไม้ในกระถางด้วย ช่วยให้การจัดเรียงแบบจำลองดอกไม้มีการกระจายตัวและไม่ซ้อนทับกัน (รูปที่ 54)



รูปที่ 53 Green cornflower (ซ้าย) Daisies and chrysanthemums (กลาง) กระบองเพชร *Mammillaria spinosissima* (ขวา)

ที่มา: (D. R. Fowler et al. 1992)



รูปที่ 54 Raspberry-O's (ซ้าย) cauliflowers&broccoli (กลาง) ดอกไม้ในกระถาง (ขวา)

ที่มา: (D. R. Fowler et al. 1992)

2.4 สรุป

การสร้างแบบจำลองพืชสามารถทำได้หลายวิธี และไม่มีแบบจำลองแบบใด สามารถกล่าวได้ว่า ถูกต้องทั้งหมด เนื่องจากโครงสร้างของพืชมีความซับซ้อน และมีการเจริญเติบโตได้ และมีความแตกต่างกันเมื่อพืชอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน

การสร้างแบบจำลองเน้นโครงสร้างนั้น มีข้อดีคือสร้างได้ง่าย เมื่อมองกฎต่างๆ เป็นส่วนๆ สามารถนำแต่ละส่วนมาประกอบรวมกันเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ได้ เช่น ส่วนของกลีบดอกเมื่อนำมาประกอบกันได้เป็นดอกไม้ เมื่อประกอบดอกไม้เข้าด้วยกันเป็นช่อดอก นำไปประกอบกับกิ่งไม้ เป็นต้น วิธีนี้มีข้อดีคือต้องใช้คนเป็นผู้กำหนดโครงสร้างให้ ซึ่งการสร้างโครงสร้างส่วน

ใหญ่มักจะอยู่ในรูปของสมการของการวนซ้ำ ทำให้หากฎที่เหมาะสมสำหรับสร้างออกมาเป็นโครงสร้างที่ต้องการได้ยาก เมื่อโครงสร้างมีมีกิ่งเป็นจำนวนมากและโครงสร้างมีความซับซ้อนมากขึ้น พารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมแบบจำลองในส่วนย่อยแต่ละส่วนก็มีจำนวนมากขึ้นด้วย เมื่อสร้างแบบจำลองสร้างโครงสร้างของพืชแล้วก็ยังคงต้องการการปรับค่าพารามิเตอร์ภายในส่วนประกอบย่อยแต่ละส่วนเพื่อให้โครงสร้างนั้นมีลักษณะและรูปร่างภายนอกตามต้องการ

ในทางกลับกัน การสร้างแบบจำลองเน้นพื้นที่นั้น มีข้อดีคือสามารถสร้างแบบจำลองลงบนพื้นที่ใดๆ ได้อย่างแน่นอนซึ่งเหมาะกับงานที่ทราบพื้นที่ที่แน่ชัด โดยไม่ต้องมีการปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะกับพื้นที่ เช่นการเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำบนก้อนหิน เมื่อเปลี่ยนรูปร่างก้อนหินไปเป็นอีกแบบหนึ่ง ก็ไม่จำเป็นต้องปรับพารามิเตอร์ใหม่ ซึ่งในจุดนี้อาจมองว่าเป็นข้อดีอยู่ได้ เนื่องจากต้องกำหนดพื้นที่ให้ก่อน หากไม่มีตัวอย่างรูปแบบของพื้นที่ในธรรมชาติเลยก็ไม่อาจบอกได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมานั้นมีความเป็นไปได้มากน้อยแค่ไหน การหากฎที่เหมาะสมก็เป็นความยากอันหนึ่งในการสร้างแบบจำลองแบบนี้ เนื่องจากไม่สามารถแบ่งปัญหาออกเป็นโครงสร้างส่วนย่อยเพื่อพิจารณาที่ละส่วนได้

ดังนั้นแบบจำลองที่ดีนอกจากมีความใกล้เคียงกับธรรมชาติแล้ว ตามความเหมาะสมของการใช้งานควรมีลักษณะข้อดีของทั้งสองประเภทรวมกัน เช่น สร้างแบบจำลองใหม่ได้ง่าย มีพารามิเตอร์ในการควบคุมน้อย และกำหนดให้แบบจำลองสร้างโครงสร้างในพื้นที่ที่ต้องการได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

พืช

Nature will reveal itself if we will only look.

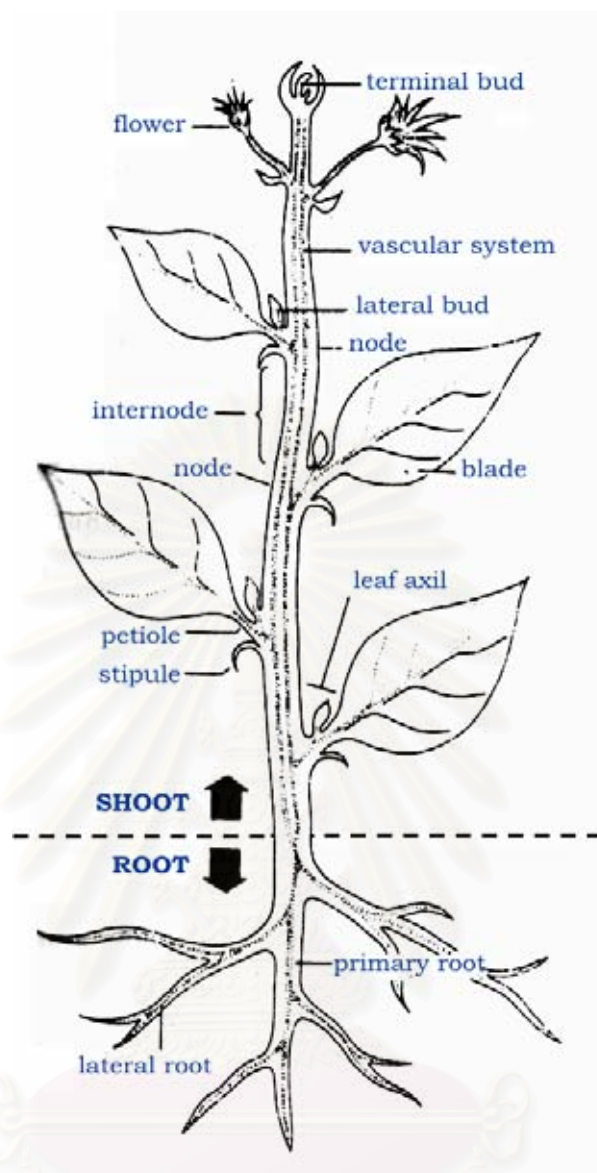
--- Thomas Alva Edison
American Inventor (1847-1941)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างแบบจำลองโครงสร้างต้นและเส้นใบของต้นไม้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องกล่าวถึงลักษณะรูปร่างส่วนต่างๆ ของพืชและส่วนประกอบของพืชในทางพฤกษศาสตร์

3.1 ส่วนประกอบของพืช

3.2 โครงสร้างของพืช

โครงสร้างหลักแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ ราก (root) ลำต้น (stem) และใบ (leaves) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันในเชิงวิวัฒนาการ (วันเพ็ญ ภูติจันทร์ 2540:59) ตามปกติลำต้นและใบเป็นโครงสร้างส่วนที่อยู่เหนือดินหรือส่วนยอด (shoot) ของพืช และมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกันอย่างมากทั้งในด้านการเจริญและโครงสร้างภายใน ทำให้ส่วนยอดของพืชมีความซับซ้อนมากกว่าส่วนรากมาก (Katherine Esau 1977:257) ภายในพืชมีเนื้อเยื่อลำเลียงอาหาร (phloem) และเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำ (xylem) ซึ่งเรียกรวมกันว่า "เนื้อเยื่อลำเลียง" โดยเนื้อเยื่อลำเลียงนี้จะพบทั้งในราก ลำต้น และใบ ต่อเนื่องเป็นระบบเดียวกัน ราก จะทำหน้าที่ดูดน้ำและเกลือแร่ และธาตุอาหารต่างๆ ภายในดินเข้าไปสู่ภายในพืช โดยน้ำและธาตุอาหารจะถูกลำเลียงเข้าไปภายในเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำภายในราก และลำเลียงต่อไปขึ้นไปยังลำต้นและใบตามลำดับ ส่วนอาหารที่พืชสร้างขึ้นที่ใบจะถูกส่งเข้าไปภายในเนื้อเยื่อลำเลียงอาหาร แล้วลำเลียงไปยังส่วนต่างๆ ของพืช โครงสร้างของพืชนั้นมีความน่าสนใจในการนำมาใช้เป็นตัวอย่างในงานด้านสถาปัตยกรรมโครงสร้าง เส้นใบแข็งแรงซึ่งรับน้ำหนักได้มากของบัววิกตอเรีย (*Victoria amazonica*) ถูกใช้เป็นพื้นฐานของการออกแบบโครงสร้างเหล็กหล่อเพื่อค้ำจุนหลังคากระจกที่เซทสเวซ และคริสตัลพาลาเซอในกรุงลอนดอน (จารุพันธ์ ทองแถม 2545:442)

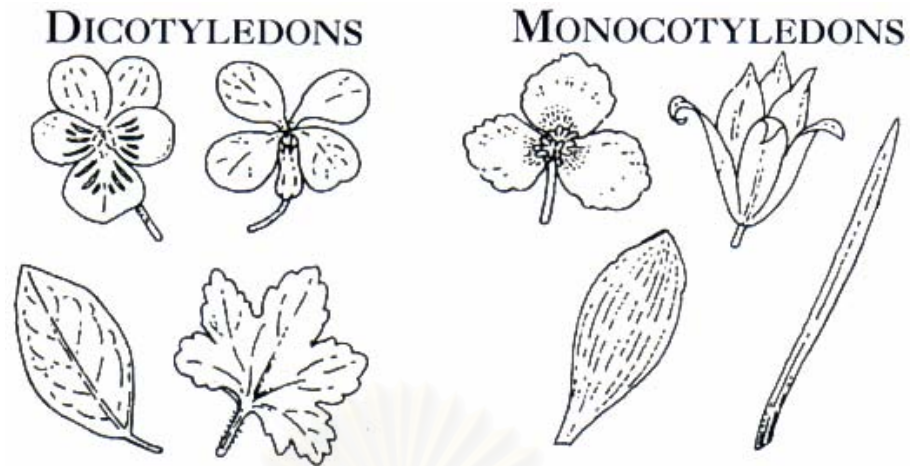


รูปที่ 55 ผังส่วนต่างๆ ของพืชดอก

ที่มา : (William T. Keeton 1969:65)

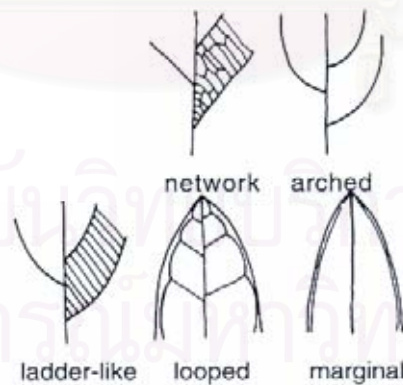
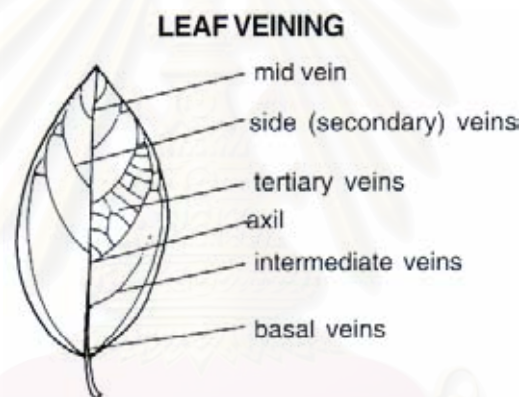
3.2.1 ลักษณะโครงสร้างของพืชใบเลี้ยงคู่และพืชใบเลี้ยงเดี่ยว

พืชใบเลี้ยงคู่ (Dicotyledons) มีลักษณะเส้นใบแบบร่างแห ส่วน**พืชใบเลี้ยงเดี่ยว (Monocotyledons)** มีลักษณะเส้นใบแบบขนาน (Christopher Grey-Wilson 1994:25) (รูปที่ 56) นอกจากลักษณะความแตกต่างของเส้นใบแล้ว พืชใบเลี้ยงคู่มีระบบรากแก้ว เห็นข้อปล้องไม่ชัด กลีบดอก 4-5 หรือทวีคูณ 4-5 และมีใบเลี้ยง 2 ใบ ส่วนพืชใบเลี้ยงเดี่ยว มีระบบรากฝอย เห็นข้อปล้องชัดเจน มีกลีบดอก 3 หรือทวีคูณ 3 และมีใบเลี้ยงใบเดี่ยว (วันเพ็ญ ภูติจันทร์ 2540:226) ในส่วนของโครงสร้างเส้นใบนั้นได้มีผู้จำแนกแตกต่างกัน อาจจำแนกโดยสังเขป (รูปที่ 57) หรืออาจแบ่งการจัดระเบียบของลักษณะเส้นใบอย่างละเอียดจนถึงลักษณะรูปแบบของเส้นใบย่อย (veinlet) ในช่องร่างแห (รูปที่ 58) และรูปแบบการเชื่อมต่อกัน (รูปที่ 59)



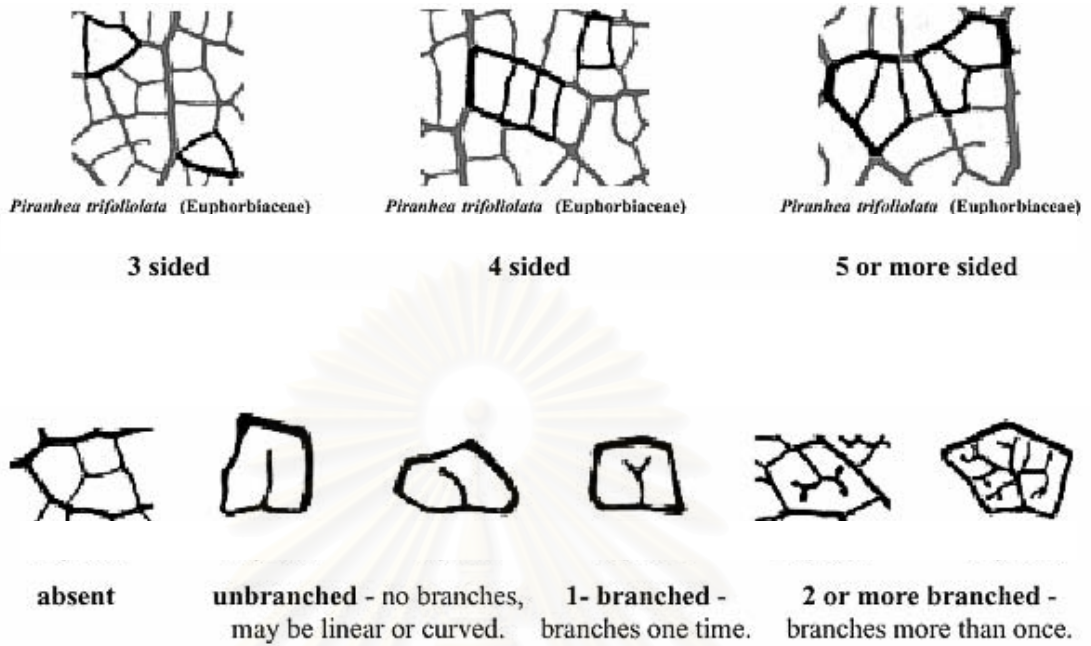
รูปที่ 56 ลักษณะของพืชใบเลี้ยงคู่(ซ้าย)และใบเลี้ยงเดี่ยว(ขวา)

ที่มา: (Christopher Grey-Wilson 1994:25)



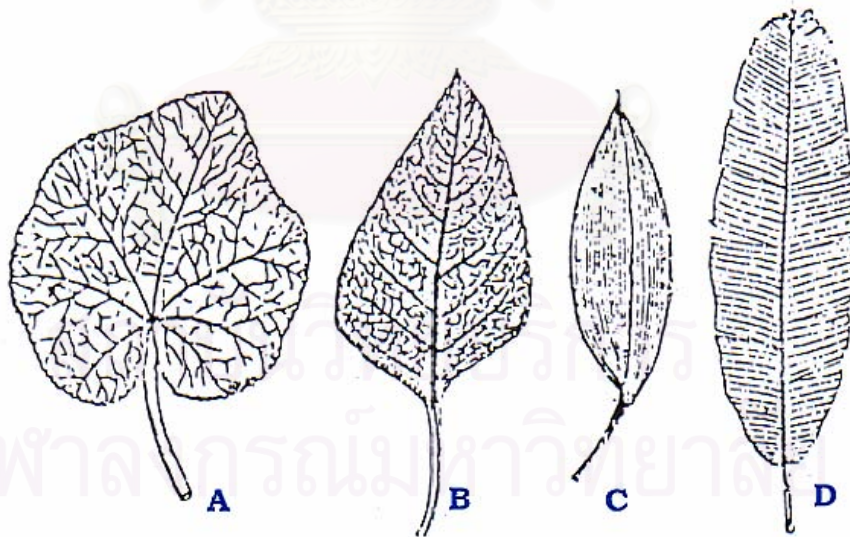
รูปที่ 57 การจัดระเบียบของเส้นใบ

ที่มา: (ไซมอน การ์ดเนอร์, พินดา สิทธิสุนทร, วิไลวรรณ อนุสารสุนทร 2543:474)



รูปที่ 58 ลักษณะเส้นใบ (แฉกใบ) และเส้นใบภายในช่องร่างแห (aereole) (แฉกล่าง)

ที่มา: (Smithsonian Institution 1999:42-43)



รูปที่ 59 การจัดระเบียบของเส้นใบ

A. แบบร่างแห B. แบบร่างแหชนิดขนนก C. แบบขนานแบบนี้ว่ามี D. แบบขนานแบบขนนก

ที่มา: (ไพฑูรย์ สุขศรีงาม 2527:321)

ถ้าหากไม่รวมถึงเส้นใบแบบร่างแหที่อยู่ภายในของใบ เป็นที่น่าสังเกตว่าโครงสร้างของลำต้นนั้นมีความคล้ายกับโครงสร้างของใบ กล่าวคือ มีเส้นใบหลักที่ดูคล้ายลำต้นและเส้นใบรองที่แตกแขนงออกมาดูคล้ายกับกิ่งก้านของต้นไม้ ลำต้นช่วยค้ำจุนกิ่งก้านและใบ ในขณะที่เส้นใบช่วยพยุงตัวใบให้มีรูปร่างที่เหมาะสม และยังทำหน้าที่ลำเลียง น้ำและสารอาหารเช่นเดียวกัน

3.3 ใบไม้

ใบเป็นส่วนสำคัญของพืชในการสังเคราะห์ด้วยแสง หายใจ และการคายน้ำ โดยทั่วไปใบเป็นส่วนหนึ่งของพืชที่ยื่นออกมาจากลำต้น มีลักษณะเป็นแผ่นแบน เพื่อให้คลอโรพลาสต์ได้รับแสงมากที่สุด ภายในมีเส้นใบซึ่งเป็นกลุ่มท่อลำเลียง สำหรับระบบการลำเลียงน้ำ แร่ธาตุ และอาหารที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยแสง เส้นใบจะติดต่อกับเส้นกลางใบ และก้านใบที่ติดอยู่กับลำต้น ใบของพืชมีหลายชนิด กล่าวคือ

3.3.1 ใบเลี้ยง (Cotyledon)

เป็นใบแรกที่อยู่ในเมล็ดพืช บางชนิดสะสมอาหารไว้ในใบเลี้ยง เพื่อใช้ในการงอกของต้นอ่อน

3.3.2 ใบเกล็ด (Scale Leaf)

เป็นใบที่เปลี่ยนสภาพมาจากใบแท้เพื่อหุ้มตาและยอดอ่อน ไม่มีสีเขียว

3.3.3 ใบดอก (Floral Leaf)

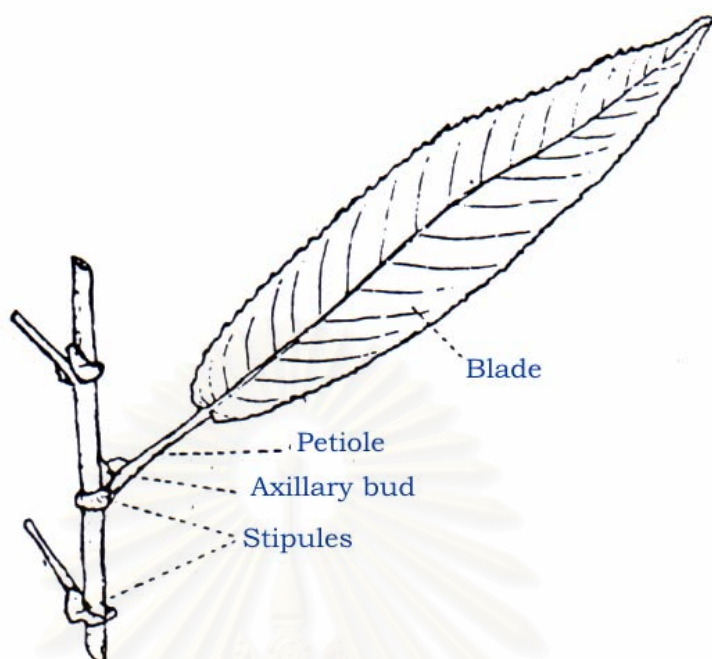
เป็นใบที่เปลี่ยนไปเป็นส่วนของกลีบเลี้ยงและกลีบดอก มักมีสีอันสวยงาม เพื่อล่อแมลง

3.3.4 ใบแท้ (Foliage Leaf)

เป็นใบสีเขียวที่พบทั่วไป

3.4 ส่วนประกอบของใบ

ใบประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วนคือ แผ่นใบ (Blade) ก้านใบ (Petiole) และหูใบ (Stipule) (รูปที่ 60)



รูปที่ 60 ส่วนประกอบของใบ

ที่มา: (ไพฑูรย์ สุขศรีงาม 2527:316)

3.4.1 แผ่นใบ (Blade)

มักมีลักษณะเป็นแผ่นแบนและบาง ภายในมีเส้นใบและเส้นกลางใบซึ่งติดต่อกับก้านใบ ลักษณะของ **ขอบใบ (Margin)** **ปลายใบ (Apex)** และ **โคนใบ (Base)** มีลักษณะที่แตกต่างกันไปในพื้นที่แต่ละชนิด (รูปที่ 66-69)

3.4.2 ก้านใบ (Petiole)

คือส่วนที่อยู่ระหว่างแผ่นใบกับลำต้น พืชบางชนิด **ไม่มีก้านใบ (Sessile leaf)** บางชนิดมี **ก้านใบ (Petiolate leaf)** ก้านใบพืชใบเลี้ยงคู่จะค่อนข้างกลม หรือกลม ส่วนก้านใบพืชใบเลี้ยงเดี่ยวมักแผ่ออกเป็นแผ่น เรียกว่า **กาบใบ (Sheath)**

3.4.3 หูใบ (Stipule)

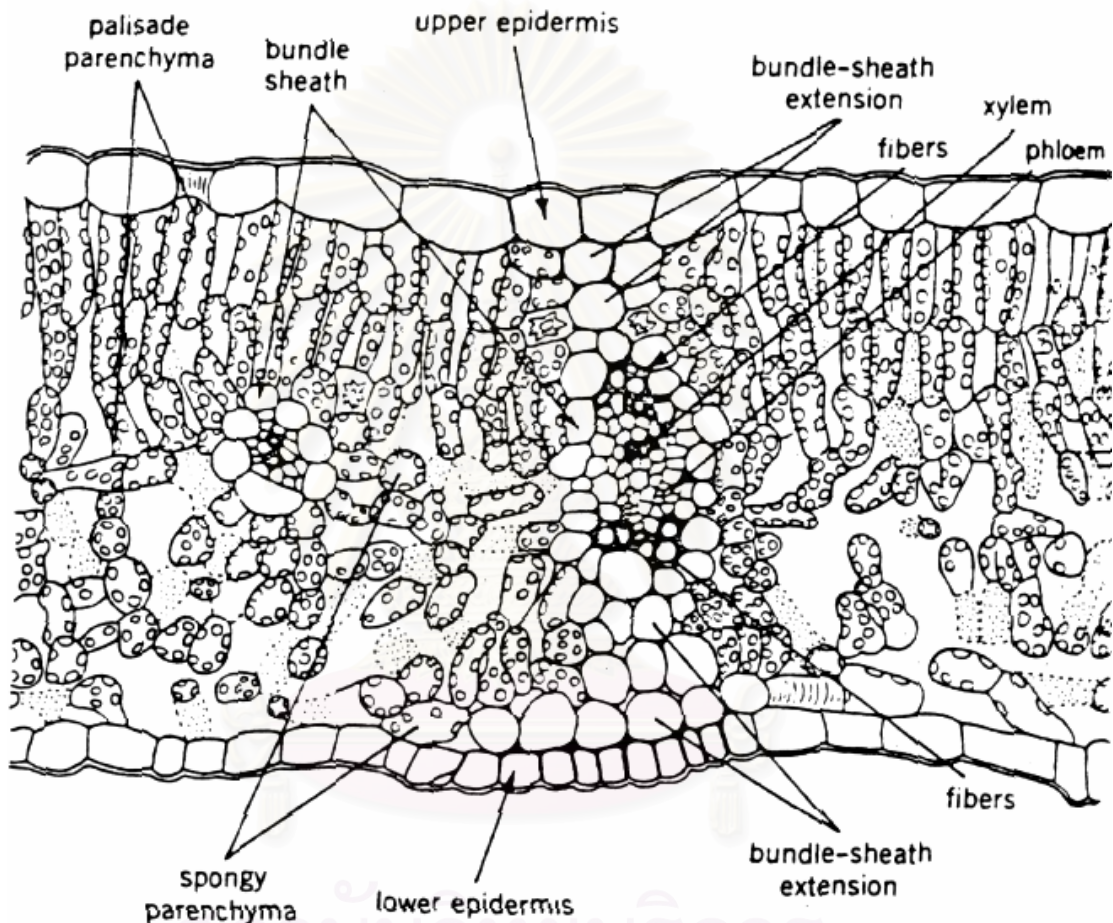
ใบหรือรอยคำที่ยื่นจากโคนของก้านใบ มีลักษณะแตกต่างกัน อาจมี 1 หรือ 2 อัน เมื่อใบแก่หูใบอาจร่วงหลุดไป ใบพืชบางชนิดอาจ **มีหูใบ (Stipulate leaf)** หรือ **ไม่มีหูใบ (Exstipulate leaf)** ก็ได้

3.5 โครงสร้างภายในของใบ

เป็นระบบเนื้อเยื่อประกอบด้วย

3.5.1 เอพิเดอร์มิส (Epidermis)

คือเนื้อเยื่อผิวใบที่ปกคลุมแผ่นใบทั้งด้านบนและด้านล่าง พืชบางชนิดอาจมีเซลล์ผิวหลายชั้น เรียกว่า **มัลติเพิล เอพิเดอร์มิส (Multiple epidermis)**



รูปที่ 61 ภาคตัดขวางของใบ

ที่มา: (Katherine Esau 1965:425)

3.5.2 มีโซฟิลล์ (Mesophyll)

เป็นชั้นของเนื้อเยื่อที่อยู่ระหว่างผิวใบด้านบนและด้านล่าง (รูปที่ 61) ประกอบด้วยเซลล์พาราเมซอฟิลล์ที่มีรูปร่างแตกต่างกันสองแบบ คือ **พาลิเสด มีโซฟิลล์ (Palisade Mesophyll)** มีคลอโรพลาสต์มาก อยู่ติดกับผิวใบด้านบน **สปันจ์ มีโซฟิลล์ (Spongy Mesophyll)** มีคลอโรพลาสต์น้อย อยู่ติดกับผิวใบด้านล่าง มีช่องว่างระหว่างเซลล์มาก มีการแลกเปลี่ยนก๊าซ และการคายน้ำ

3.5.3 กลุ่มท่อลำเลียง (Vascular Tissue)

กลุ่มท่อลำเลียงในใบคือเส้นใบ (Vein) ซึ่งมีลักษณะการเรียงเส้นใบ (Venation) 2 แบบ คือ **แบบตาข่าย (Reticulate)** และ **แบบขนาน (Parallel)** เส้นใบแบบตาข่ายจะมีการแยกสาขาของเส้นใบจากเส้นกลางใบหรือเส้นใบหลักแยกย่อยลงมาเป็นเส้นเล็กๆ ตามลำดับ ส่วนเส้นใบแบบขนาน เป็นเส้นใบที่มีขนาดเท่าๆ กันเรียงขนานไปในแนวเดียวกัน กลุ่มท่อลำเลียงอาจถูกล้อมรอบด้วยกลุ่มเนื้อเยื่อที่เรียกว่า **เยื่อหุ้มท่อลำเลียง (Bundle sheath)**

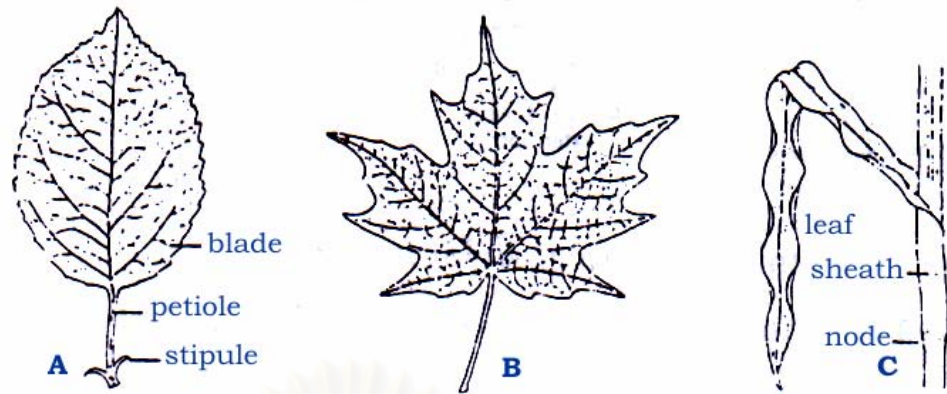
เนื้อเยื่อลำเลียงประกอบด้วย **เนื้อเยื่อลำเลียงน้ำ (Xylem)** ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและธาตุอาหาร และ **เนื้อเยื่อลำเลียงอาหาร (Phloem)** ทำหน้าที่ลำเลียงอาหาร เนื้อเยื่อลำเลียงน้ำส่วนใหญ่ประกอบด้วยเซลล์ **เทรคีต (Tracheids)** และ **เซลล์เวสเซล (Vessel Member)** เนื้อเยื่อลำเลียงอาหารประกอบด้วย **เซลล์ท่อลำเลียงอาหาร (Sieve Tube Member)** และ **เซลล์ประกอบ (Companion cell)**

3.6 ชนิดของใบแท้

แบ่งออกเป็นสองชนิดคือ **ใบเดี่ยว (Simple Leaf)** คือใบที่มีแผ่นใบ 1 แผ่นบนก้านใบ (รูปที่ 62) และ **ใบประกอบ (Compound Leaf)** คือใบที่มีแผ่นใบมากกว่า 1 แผ่นบนก้านใบ (รูปที่ 63)

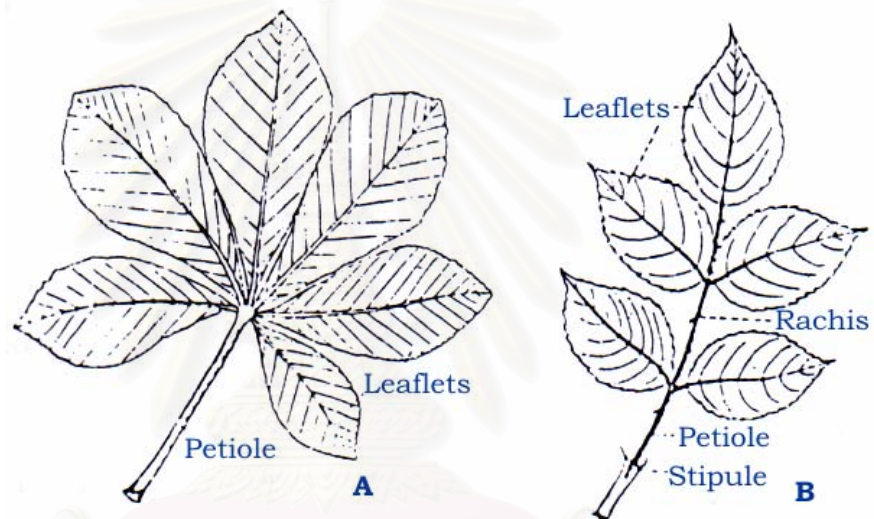
ใบประกอบ แบ่งย่อย ออกเป็น

- **ใบประกอบแบบนิ้วมือ (Palmately Compound Leaf)** เป็นใบประกอบที่ใบย่อยแยกออกจากก้านใบที่จุดเดียวกัน
- **ใบประกอบแบบขนนก (Pinnately Compound Leaf)** เป็นใบประกอบที่ใบย่อยเรียงตัวคล้ายขนนก แยกออกจากแกนกลาง จัดเรียงเป็นคู่ๆ หรืออาจเรียงสลับก็ได้ ถ้าปลายสุดของแกนกลางมี 1 ใบ เรียกว่า **แบบขนนกคี่ (Odd-pinnate)** ถ้ามี 2 ใบเรียก **แบบขนนกคู่ (Even-pinnate)** ในใบประกอบเมื่อพิจารณาจากแกนกลางสามารถแบ่งย่อยได้เป็น **ยูนิพินเนต หรือ 1-พินเนต (Unipinnate or 1-Pinnate)** แกนกลางไม่แตกแขนง เช่น ใบมะขาม ถั่วลิสง ชี่เหล็ก **ไบพินเนต หรือ 2-พินเนต (Bipinnate or 2-Pinnate)** แกนกลางแตกแขนง 1 ครั้ง เช่น จามจุรี หางนกยูงไทย **ไตรพินเนต หรือ 3-พินเนต (Tripinnate or 3-Pinnate)** แกนกลางที่สองจะแตกแขนงอีกครั้งเป็นแกนที่สาม เช่น ใบมะรุ้ม ปีบ เพกา **ดีคอมพอนด์ (Decompond)** ใบประกอบที่มีแกนกลางแตกแขนงมากกว่า 3 ครั้ง



รูปที่ 62 ใบเดี่ยว

ที่มา: (ไพฑูรย์ สุขศรีงาม 2527:323)



รูปที่ 63 ใบประกอบ

A แบบนิ้วมือ

B แบบขนนก

ที่มา: (ไพฑูรย์ สุขศรีงาม 2527:323)



รูปที่ 64 ใบประกอบแบบขนนก

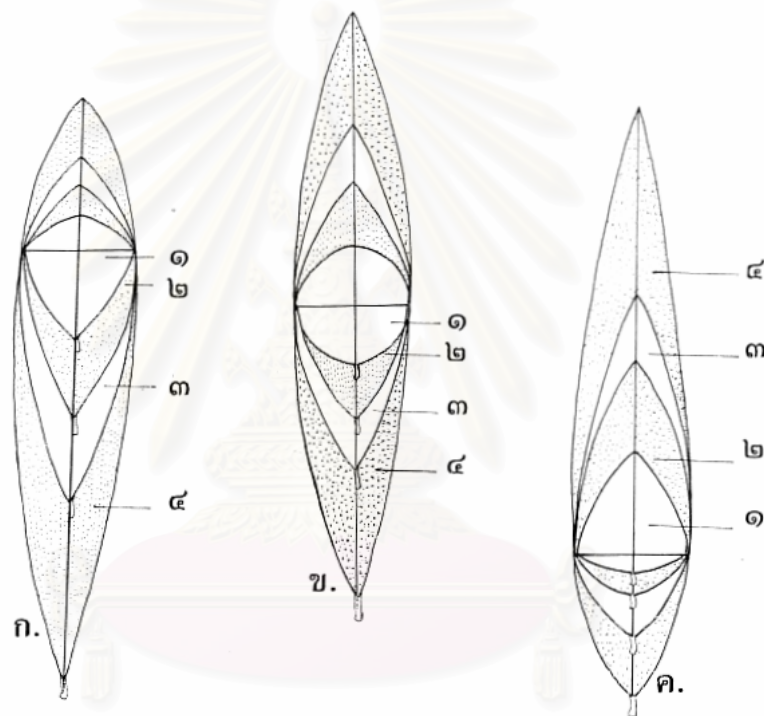
A. ยูนิพินเนท (บนซ้าย) B. ไบพินเนท (ล่างซ้าย) C. ไตรพินเนท (ขวา)

ที่มา: (ไพฑูรย์ สุขศรีงาม 2527:324-325)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.7 รูปร่างของใบ

รูปร่างใบไม้แบ่งได้หลายแบบ เมื่อแบ่งรูปใบตามอัตราส่วนจำแนกได้เป็น 3 ประเภทหลักคือ กลุ่มใบรูปไข่กลับ (obovate-series) กลุ่มใบรูปรี (elliptic-series) และ กลุ่มใบรูปไข่ (ovate-series) (รูปที่ 65) ลักษณะปลายใบ (รูปที่ 66) ลักษณะโคนใบ (รูปที่ 67) และขอบใบ (รูปที่ 68) มีหลายแบบ ทำให้ใบพืชแต่ละชนิดมีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกันมากมาย (รูปที่ 69)



รูปที่ 65 ลักษณะรูปใบ

ก.กลุ่มใบรูปไข่กลับ (obovate-series)

- ๑.ใบรูปสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดทงาย (obrhombic), ๑:๑
- ๒.ใบรูปไข่กลับ (obovate), ๑:๒
- ๓.ใบรูปขอบขนานแกมรูปไข่กลับ (obovate-oblong), ๑:๓
- ๔.ใบรูปใบหอกแกมรูปไข่กลับ (obovate-lanceolate), ๑:๕

ข.กลุ่มใบรูปรี (elliptic-series)

- ๑.ใบรูปทรงกลม (globose), ๑:๑
- ๒.ใบรูปรี (elliptic), ๑:๒
- ๓.ใบรูปขอบขนาน (oblong), ๑:๓
- ๔.ใบรูปใบหอก (lanceolate), ๑:๕

ค.กลุ่มใบรูปไข่ (ovate-series)

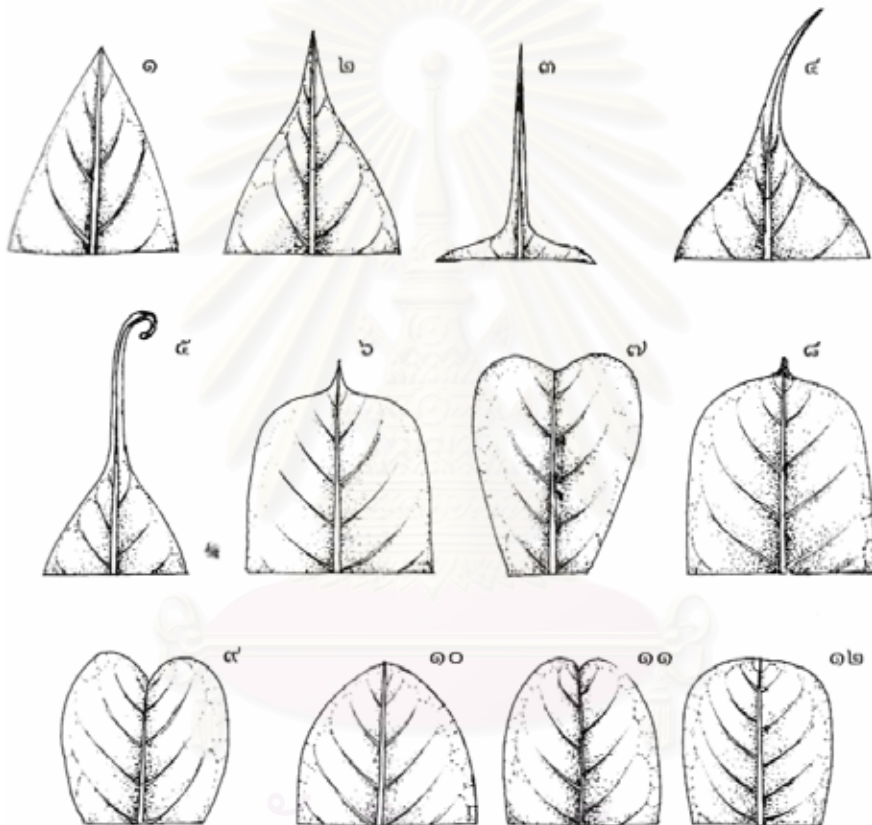
๑.ใบรูปสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด (rhombic), ๑:๑

๒.ใบรูปไข่ (ovate), ๑:๒

๓.ใบรูปขอบขนานแกมรูปไข่ (ovate-oblong), ๑:๓

๔.ใบรูปใบหอกแกมรูปไข่ (ovate-lanceolate), ๑:๕

ที่มา: (ราชบัณฑิตยสถาน 2541:16)



รูปที่ 66 ลักษณะปลายใบ

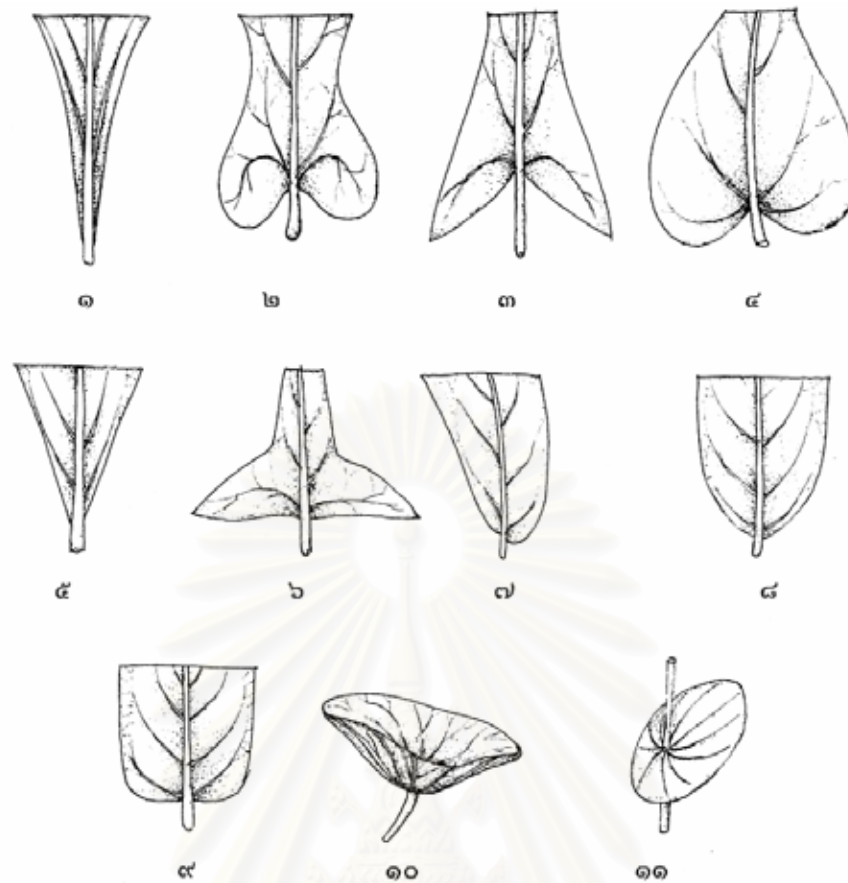
๑.แหลม (acute) ๒.เรียวแหลม (acuminate) ๓.แหลมเข็ม (aristate)

๔.ยาวคล้ายหาง (caudate) ๕.ม้วน (cirrose) ๖.เป็นติ่งแหลม (cuspidate)

๗.เว้าตื้น (emarginate) ๘.เป็นติ่งหนาม (mucronate) ๙.รูปหัวใจกลับ (obcordate)

๑๐.มน (obtus) ๑๑.เว้าปุ่ม (retuse) ๑๒.ตัด (truncate)

ที่มา: (ราชบัณฑิตยสถาน 2541:17)

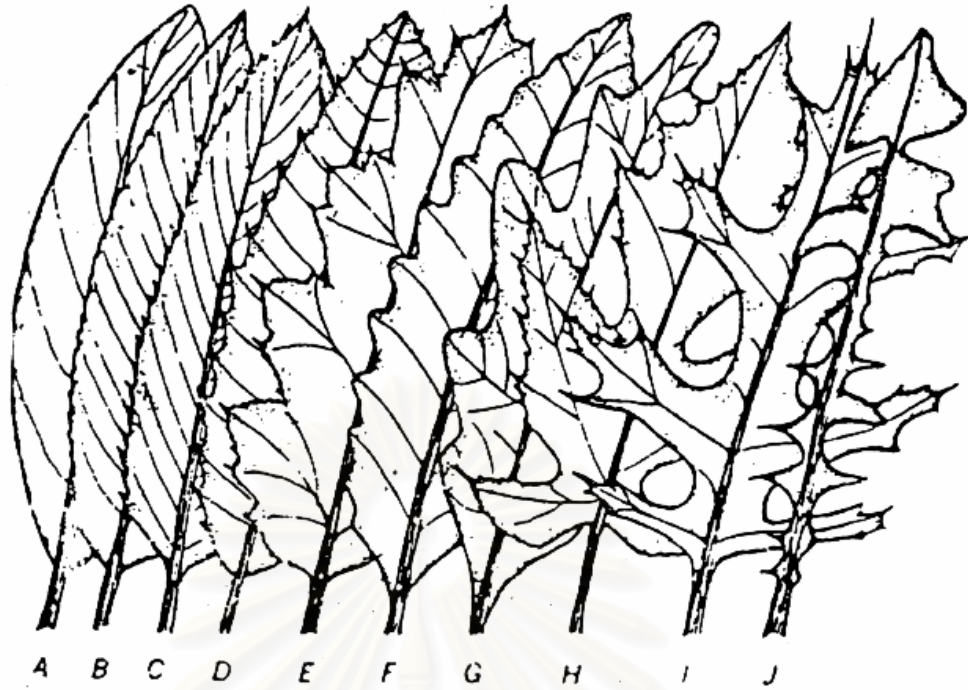


รูปที่ 67 ลักษณะโคนใบ

- ๑.สอบเรียว (attenuate) ๒.รูปติ่งหู (auriculate) ๓.รูปเงี่ยงลูกศร (sagittate)
 ๔.รูปหัวใจ (cordate) ๕.รูปสามเหลี่ยม (cuneate) ๖.รูปเงี่ยงใบหอก (hastate)
 ๗.เฉียง (oblique) ๘.มน (obtuse) ๙.ตัด (truncate)
 ๑๐.แบบก้นปัด (peltate) ๑๑.รอบข้อ (perforiate)

ที่มา: (ราชบัณฑิตยสถาน 2541:19)

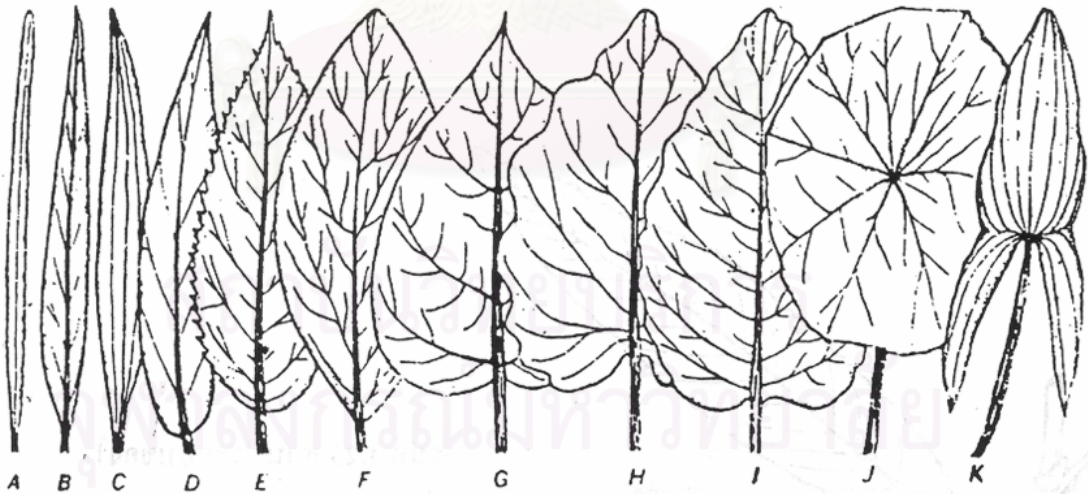
สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 68 ลักษณะของขอบใบแบบต่าง ๆ

- A. ขอบเรียบ (Entire) B. จักฟันเลื่อยถี่ (Serrate) C-D. จักฟันเลื่อย (Serrate)
E. รูปหยักซี่ฟัน (Dentate) F. หยักมน (Crenate) G-H. พู (Pinnately lobed)
I. แฉก (Pinnately parted) J. หยักแบบขนนก (Pinnatifid)

ที่มา: (ไพฑูรย์ สุขศรีงาม 2527:318)



รูปที่ 69 รูปร่างของแผ่นใบแบบต่าง ๆ

- A. รูปแถบ (Linear) B-C. แบบรูปใบหอก (Lanceolate) D. แบบรูปไข่ (Ovate)
E-F. แบบรูปรี (Elliptical) G-H. แบบรูปหัวใจ (Cordate) I. แบบรูปไข่ (Oval)
J. แบบก้นปิต (Peltate) K. แบบหัวลูกศร (Sagittate)

ที่มา: (ไพฑูรย์ สุขศรีงาม 2527:317)

3.8 สรุป

เกี่ยวกับโครงสร้างของพืชตามที่ได้กล่าวแล้วโดยสังเขป โครงสร้างของพืชจัดได้ว่ามีรูปแบบ โครงสร้างที่หลากหลาย มีการจัดเรียงของใบหลายแบบ มีลักษณะเส้นใบแตกต่างกัน เส้นใบไม้ คือกลุ่มท่อลำเลียงใช้ในการลำเลียงอาหารสำหรับพืช ที่มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับส่วนอื่นๆ ของพืชจากการสังเกตได้คือมีการแตกแขนงจากจุดโคนใบไปยังบริเวณเนื้อใบส่วนอื่นๆ เปรียบได้กับกิ่งไม้ที่มีการแตกแขนงจากโคนต้นไม้ไปยังส่วนพุ่มไม้ แม้แต่ส่วนของใบที่เปลี่ยนไปเป็น กลีบดอกไม้ที่มีสีสันสวยงามซึ่งมีผลตายของเส้นใบไม้ปรากฏอยู่ในใบต่อไปได้แสดงวิธีสร้างแบบจำลองใบไม้ด้วย L-systems ที่ใช้สมการและพารามิเตอร์เป็นตัวควบคุมลักษณะโครงสร้าง แต่ถึงกระนั้น โครงสร้างและหน้าที่ของเส้นใบไม้ก็ยังคงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการค้นพบขั้นตอนวิธีใหม่สำหรับสร้างโครงสร้างของพืช ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 5 และ 6



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

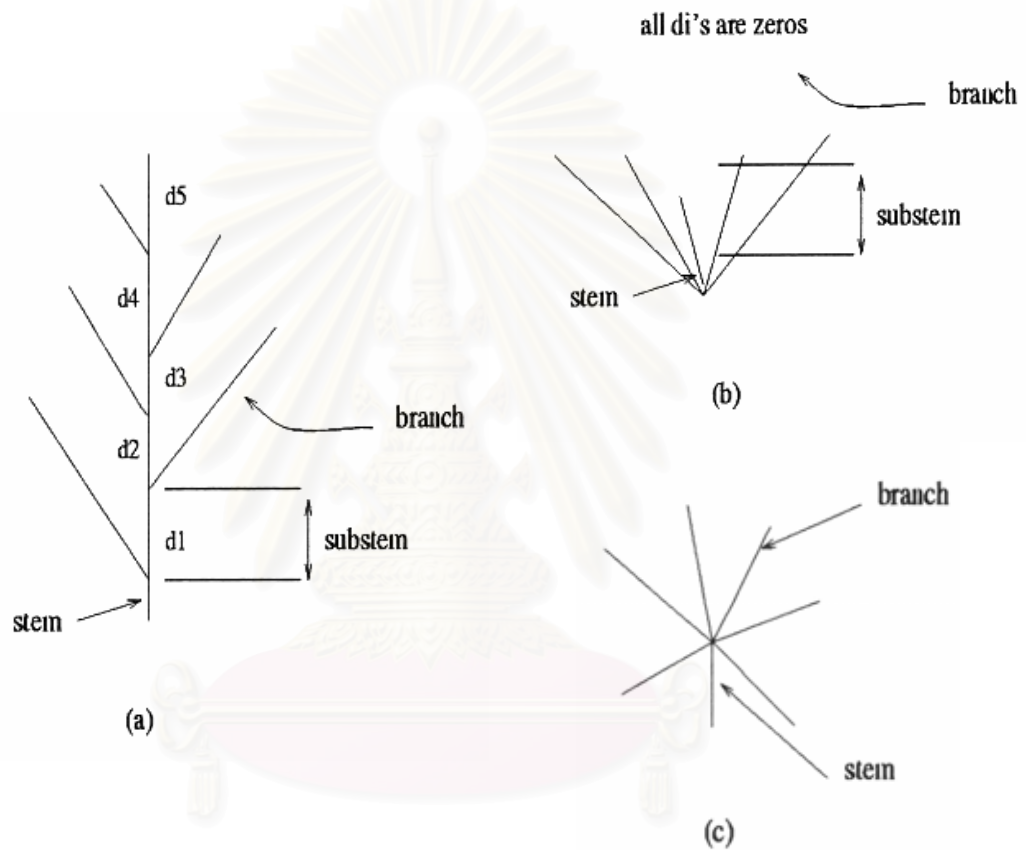
การสร้างแบบจำลองใบไม้ด้วย L-systems และ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

*If the Lord Almighty had consulted me before
embarking on creation I should have
recommended something simpler.*

--- Alphonso X (Alphonso the Wise)
King of Castile and Leon (attributed) (1221-1284)

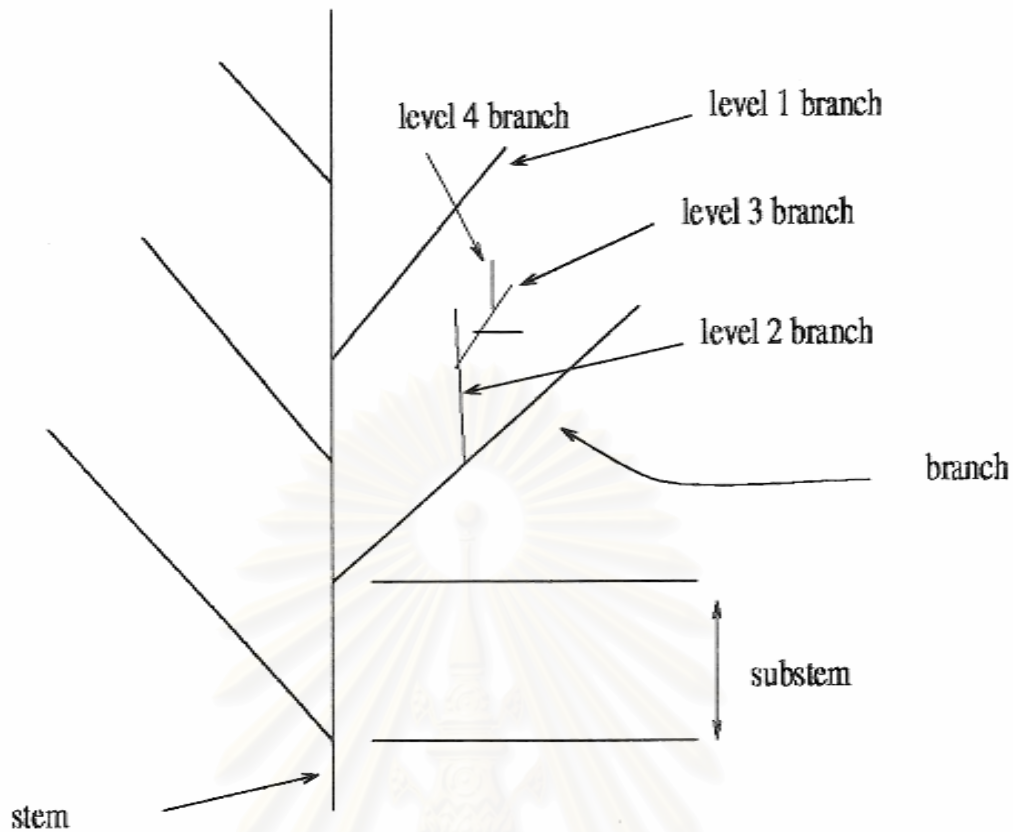
ในบทนี้กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองใบไม้ด้วยขั้นตอนวิธี L-systems ข้อดีของ L-systems คือสามารถปรับปรุงการสร้างกฎต่างๆ มีการกำหนดเงื่อนไขและสร้างกฎเฉพาะได้เป็นอย่างดี และมีการวนซ้ำ L-systems จึงเหมาะสำหรับการสร้างกฎของพืชที่มีลักษณะการวนซ้ำและมีความซับซ้อน ผลลัพธ์ที่ได้จาก L-systems นั้นสามารถประยุกต์ให้แบบจำลองมีการขยายขนาดได้หรือเติบโตได้จึงได้รับความนิยมใช้ในงานวิจัยส่วนใหญ่ซึ่งใช้ในจำลองการเจริญเติบโตของพืช ปัญหาหนึ่งของ L-systems คือการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกฎที่สร้างขึ้นมาเพื่อให้ผลลัพธ์นั้นมีรูปร่างตามที่ต้องการ เนื่องจากลักษณะการวนซ้ำของ L-systems ทำให้การปรับพารามิเตอร์มีความซับซ้อนเมื่อเปลี่ยนพารามิเตอร์ตัวหนึ่งแม้เพียงเล็กน้อยอาจทำให้มีผลกระทบกับผลลัพธ์ทั้งหมดได้ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงได้นำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาใช้เพื่อควบคุมพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติ และกำหนดให้พารามิเตอร์ทั้งหมดลตรูอยู่ในสมการเส้นโค้งทำให้ใช้พารามิเตอร์จำนวนน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับสมการในวิธีแบบเดิม และการปรับปรุงให้อยู่ในสมการเส้นโค้งช่วยให้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม Genetic Algorithms (D.E. Goldberg 1989) ทำงานได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

ในงานวิจัย Simulation of Leaf Growth Based On A Rewriting System: A Unified Leaf Model โดย C. Lursinsap, P. Sophatsathit, S. Siripant และ Y. Shinagawa นำเสนอแบบจำลองการสร้างใบไม้รวมด้วย L-systems สามารถสร้างใบไม้ได้หลายแบบ ใบไม้ทั่วไป รูปที่ 70(a) ใบไม้ของต้นจิงโกะ หรือ แป๊ะก๊วย Maidenhair tree; *Ginko biloba* (Ginkgoaceae) รูปที่ 70(b) และ ใบบัว Lotus; *Nelumbo nucifera* (Nelumbonaceae) รูปที่ 70(c)



รูปที่ 70 โครงสร้างใบไม้ แสดงกิ่งและก้าน (a) เมื่อกำหนดให้ $d_i=0$ สำหรับ i ทั้งหมด (b) เมื่อกำหนด $d_i=0$ สำหรับ $i > 1$ และปรับมุมระหว่างก้าน

ที่มา: (C. Lursinsap, P. Sophatsathit, S. Siripant and Y. Shinagawa 2000:4)



$$T = S[L][R] \quad (1)$$

$$S = (\theta_{S,t}, M)S \mid (\theta_{S,t}, M) \quad (2)$$

$$L = [P]L \mid (\theta_{L,t}, M)L \mid \phi \quad (3)$$

$$P = [P]P[P] \mid (\theta_{P,t}, M)P \mid \phi \quad (4)$$

$$R = [P]R \mid (\theta_{R,t}, M)R \mid \phi \quad (5)$$

รูปที่ 71 โครงสร้างใบไม้ และกฎแบบจำลองใบไม้รวม

ที่มา: (C. Lursinsap, P. Sophatsathit, S. Siripant and Y. Shinagawa 2000:5)

จากรูปที่ 71 กำหนดให้ T แทนใบไม้ S แทนก้านใบ (stem) P แทนก้านใบย่อย (substem) L และ R แทนก้านใบทางซ้ายและทางขวา M เป็นค่าที่กำหนด $\theta_{S,t}$, $\theta_{L,t}$, $\theta_{R,t}$, $\theta_{P,t}$ แทนมุมของก้านใบลำดับต่างๆ ส่วน ϕ หมายถึง null จากสมการข้างต้นเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวทำให้สร้างใบไม้รูปร่างแตกต่างกันได้ แต่เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมมีหลายตัวและมีผลกระทบต่อเนื่องกันจากมุมของก้านใบลำดับต่างๆ ที่ต่อเชื่อมโยงกัน หากต้องการเพียงการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ลำดับแรก ตัวอย่างเช่นเมื่อปรับค่าให้ก้านใบสั้นลงแต่ต้องการให้รูปร่างของใบทั้งหมดคงเดิม ดังนั้นแล้ว มีจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงค่ามุมลำดับอื่นๆ ให้มีเหมาะสมด้วย

4.1 ปัญหาการควบคุมพารามิเตอร์

เมื่อภูมิมีการวนซ้ำจึงมีพารามิเตอร์จำนวนมาก ทำให้ความซับซ้อนในการควบคุมพารามิเตอร์ เป็นปัญหาที่สำคัญของ L-systems เพื่อแสดงปัญหาให้ชัดเจนมากขึ้น ตัวอย่างของ กฎสำหรับ สร้างเส้นโค้ง ที่ประกอบด้วยเส้นตรงจำนวน 20 เส้น แต่ละเส้นทำมุมเริ่มต้น 30 องศาและ ลดลงด้วยอัตราส่วน 0.99 องศาสำหรับเส้นต่อไป และความยาวเส้นตรงแรก 10 สำหรับเส้น ต่อไปกำหนดให้มีอัตราส่วนยาว 0.8 เท่าของเส้นแรก

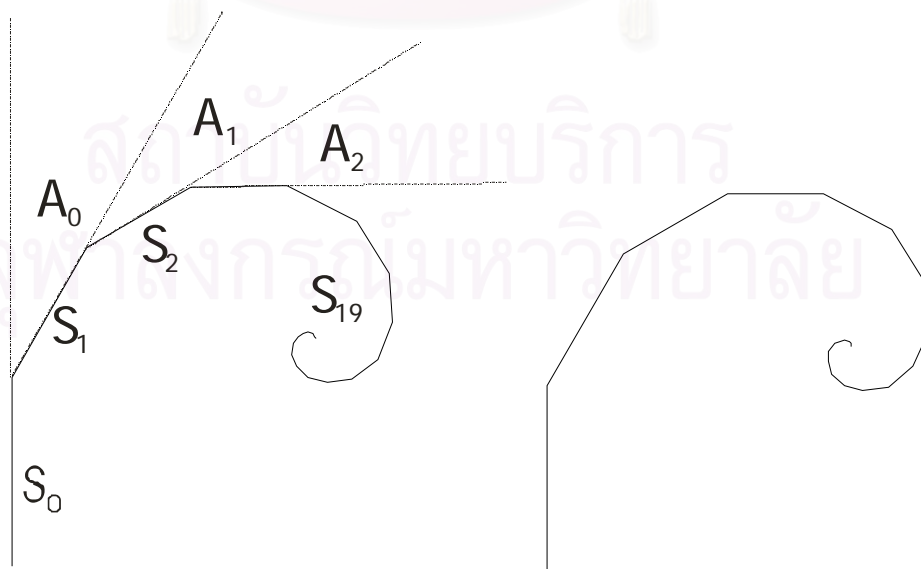
สามารถเขียนเป็นกฎ L-systems ได้ดังนี้

$$\omega: T \rightarrow S(20,30,10)$$

$$P1: S(n,a,b):n \geq 1 \rightarrow F(b)R(a)S(n-1,a*0.99,b*0.8)$$

(4.1)

คำสั่ง $S(n,a,b)$ จะกลายเป็นคำสั่ง $F(b)$ $R(a)$ และ $S(n,a,b)$ ในรอบถัดไป คำสั่ง $F(b)$ เป็น คำสั่งให้สร้างเส้นตรง S_0 มีความยาว $b=10$ และด้วยคำสั่ง $R(a)$ ทำให้หมุนเส้นตรงที่จะวาด ต่อมาไปทางขวา A_0 30 องศา ในรอบต่อมา $S(n-1,a*0.99,b*0.8) - F(b)$ เป็นคำสั่งให้สร้าง เส้นตรง S_1 ที่มีความยาว $b=10*0.8$ และหมุนไปทางขวา $A_0 = a = 30*0.99$ องศา ความยาว ของเส้นตรงและมุมจะค่อยๆ ลดลงจนครบทั้ง 20 เส้น เมื่อวาดภาพผลที่ได้จาก L-systems ดังนี้



รูปที่ 72 เส้นโค้งสร้างด้วย Parametric L-systems

ตารางแสดงการคำนวณพารามิเตอร์ ในรอบที่ 2 เส้นมีความยาว 8 และมุม 29.7 ในรอบที่ 3 เส้นมีความยาว 6.4 และมุม 29.403 เมื่อผ่านไป 20 รอบจะมีค่าสั่งลากเส้นตรงและหมุน (F และ R) ทั้งหมด 20 คู่ หรือคิดเป็นการคำนวณพารามิเตอร์ทั้งหมด 40 ครั้ง

ตาราง 2 แสดงการคำนวณพารามิเตอร์เส้นโค้ง

รอบที่	ผลที่ได้
1	F(10)R(30)S(19,29.7,8)
2	F(10)R(30)F(8)R(29.7)S(18,29.403,6.4)
3	F(10)R(30)F(8)R(29.7)F(6.4)R(29.403)S(17,29.10897,5.12)
4	F(10)R(30)F(8)R(29.7)F(6.4)R(29.403)F(5.12)R(29.10897)S(16,28.8178803,4.096)
5	F(10)R(30)F(8)R(29.7)F(6.4)R(29.403)F(5.12)R(29.10897)F(4.096)R(28.8178803)S(15,28.529701497,3.2768)
6	F(10)R(30)F(8)R(29.7)F(6.4)R(29.403)F(5.12)R(29.10897)F(4.096)R(28.8178803)F(3.2768)R(28.529701497)S(14,28.24440448203,2.62144)
7	F(10)R(30)F(8)R(29.7)F(6.4)R(29.403)F(5.12)R(29.10897)F(4.096)R(28.8178803)F(3.2768)R(28.529701497)F(2.62144)R(28.24440448203)S(13,27.9619604372097,2.097152)
8	F(10)R(30)F(8)R(29.7)F(6.4)R(29.403)F(5.12)R(29.10897)F(4.096)R(28.8178803)F(3.2768)R(28.529701497)F(2.62144)R(28.24440448203)F(2.097152)R(27.9619604372097)S(12,27.6823408328376,1.6777216)
9	F(10)R(30)F(8)R(29.7)F(6.4)R(29.403)F(5.12)R(29.10897)F(4.096)R(28.8178803)F(3.2768)R(28.529701497)F(2.62144)R(28.24440448203)F(2.097152)R(27.9619604372097)F(1.6777216)R(27.6823408328376)S(11,27.4055174245092,1.34217728)
..	..
20	F(10)R(30)F(8)R(29.7)F(6.4)R(29.403)F(5.12)R(29.10897)F(4.096)R(28.8178803)F(3.2768)R(28.529701497)F(2.62144)R(28.24440448203)F(2.097152)R(27.9619604372097)F(1.6777216)R(27.6823408328376)F(1.34217728)R(27.4055174245092)F(1.073741824)R(27.1314622502641)F(0.8589934592)R(26.8601476277615)F(0.68719476736)R(26.5915461514839)F(0.549755813888)R(26.3256306899691)F(0.4398046511104)R(26.0623743830694)F(0.35184372088832)R(25.8017506392387)F(0.281474976710656)R(25.5437331328463)F(0.225179981368525)R(25.2882958015178)F(0.18014398509482)R(25.0354128435026)F(0.144115188075856)R(24.7850587150676)S(0,24.5372081279169,0.115292150460685)

จะเห็นว่าในการวาดเส้นโค้งที่ประกอบด้วยเส้น n เส้นจะต้องมีพารามิเตอร์ควบคุมอย่างน้อย $2n$ ตัว (คือค่าความยาวและองศา) และถ้าในกรณีที่เส้นโค้งที่ต้องการสร้างด้วย L-systems มีความซับซ้อนมาก จะไม่สามารถจัดพารามิเตอร์ให้อยู่ในรูปสมการ $a_n = a_{n-1} * k$ ได้โดยง่าย อาจต้องใช้สมการโพลิโนเมียลกำลังสูงแทนซึ่งจะมีสัมประสิทธิ์มากขึ้น เช่น $a_n x^m + \dots + a_2 x^2 + a_1 x^1 + a_0$; $x \in [0.0, 1.0]$ ทำให้พารามิเตอร์ที่ต้องใช้ควบคุมมีมากกว่า $(n+1)(m+1)$ ตัวต่อเส้นโค้ง 1 เส้น ถ้ามีเส้นโค้ง j เส้น

ต้องใช้พารามิเตอร์อย่างน้อย $\sum_{i=1}^j (n_i + 1)(m_i + 1)$ ตัว เมื่อ n_i, m_i คือจำนวนพารามิเตอร์ของเส้นโค้งที่ i , n แทนค่าความยาว และ m แทนค่ามุมมอง

ตัวอย่างเช่นในใบไม้ 1 ใบมีเส้นใบข้างละ 10 เส้น รวมเส้นกลางเป็น 21 เส้น แต่ละเส้นสมมติให้เส้นย่อยใช้สมการกำลังสอง $(n=2, m=2)$ รวมจำนวนพารามิเตอร์ทั้งหมด $(2+1)*(2+1)*21 = 378$ ตัว ซึ่งมีจำนวนมากเกินไปสำหรับมนุษย์และไม่เหมาะสำหรับคอมพิวเตอร์ในการค้นหาค่าที่เหมาะสมแบบอัตโนมัติโดยใช้ขั้นตอนวิธีทางเชิงพันธุกรรม

ปัญหาต่อมาถ้าหากนำขั้นตอนวิธีทางเชิงพันธุกรรมมาใช้ ในการคำนวณคำตอบแต่ละครั้งเพื่อวัดค่าความเหมาะสม (fitness) การคำนวณก็จะเสียเวลามากเนื่องจากต้องคำนวณสมการในรูปยกกำลังทุกๆ ครั้ง เช่น

$$O: T \rightarrow S(10, 1)$$

$$P_1: S(n, x): n \geq 1 \rightarrow F(a_n x^m + \dots + a_2 x^2 + a_1 x^1 + a_0) R(b_n x^n + \dots + b_2 x^2 + b_1 x^1 + b_0) S(n-1, x-0.1)$$

(4.2)

เมื่อจำนวนรอบการวนซ้ำ = 10 ; x เป็นค่าตำแหน่งของฟังก์ชัน F และ R ; การคำนวณที่เกิดขึ้นคืออย่างน้อย $10*2 = 20$ ครั้งต่อ 1 เส้น หรือกรณี 21 เส้นใช้การคำนวณทั้งหมด 420 ครั้ง

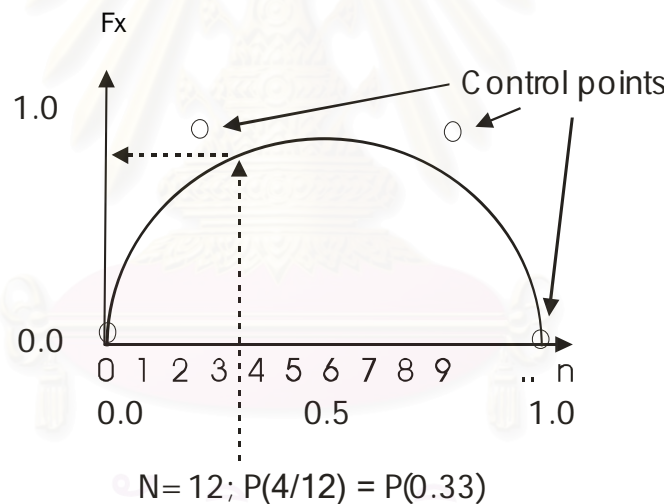
ถ้าในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธีทางเชิงพันธุกรรม มีความจำเป็นจะต้องใช้การคำนวณ 420 ครั้ง สมมติให้ประชากร (individual) 1 ตัว ใช้การคำนวณ 420 ครั้ง ถ้าหากมีกลุ่มประชากร 100 ตัวและทำการทดลองทั้งหมด 200 รุ่น ดังนั้น ต้องใช้การคำนวณทั้งหมด $420*100*200 = 8,400,000$ ครั้ง

ปัญหาที่ตามอีกอย่างหนึ่งก็คือเมื่อมีการเปลี่ยนพารามิเตอร์หรือสัมประสิทธิ์ภายในสมการเริ่มต้น มีความจำเป็นที่จะต้องเรียกให้ L-parser ซึ่งเป็นส่วน parser ของ L-systems ทำงานเพื่อคำนวณหาพารามิเตอร์ในรอบสุดท้ายใหม่ การคำนวณตรงนี้เสียเวลามาก เช่นเดียวกัน

4.2 Tag Functions

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การปรับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ L-systems ใช้เวลามาก และมีความซับซ้อนมากกว่าที่มนุษย์จะปรับได้ เพื่อแก้ไขปัญหาในการควบคุมพารามิเตอร์ที่ซับซ้อน ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีสร้างแบบจำลองใบไม้โดยนักคณิตศาสตร์ L-systems ที่กำหนดให้และปรับพารามิเตอร์ด้วยขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม โครงสร้างที่ใช้ภายในใบไม้เป็นรูปร่างที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ให้เหมาะสมกับรูปร่างของใบไม้ที่กำหนดให้ เนื่องจากการปรับพารามิเตอร์ใน Parametric L-systems ยังมีความล่าช้าเมื่อใช้ร่วมกับขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม จึงนำเสนอฟังก์ชันควบคุมที่เรียกว่า tag-functions เพื่อใช้แทน เมื่อเปลี่ยนการควบคุมจากการปรับค่าพารามิเตอร์จำนวนมาก มาเป็นการปรับค่าของจุดควบคุม ใน spline curve แทน เวลาที่ใช้สำหรับการคำนวณด้วยวิธีนี้ลดลงเป็นที่น่าพอใจ

Tag function ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัวใช้ควบคุม จุดควบคุมของ spline curve มีรูปร่างคล้ายกับ tag ใน html คือใช้สัญลักษณ์ < และ > เป็นตัวกำหนด ภายใน tag function ประกอบด้วย ชื่อฟังก์ชันเช่น <Fx> แทนฟังก์ชัน Fx



รูปที่ 73 Tag function

เมื่อใช้งาน หลังจากการทำงานของ L-parser, tag function จะถูกเพิ่มด้วยตัวเลขตามหลังเช่น <Fx1> ตัวเลข 1 นี้ไม่ใช่พารามิเตอร์โดยตรงแต่ใช้แทนตำแหน่งของฟังก์ชัน Fx ที่ $1/nFx$ หรือ $Fx(1/nFx)$ เมื่อ nFx คือจำนวน tag function ตัวที่มากที่สุดของฟังก์ชัน Fx ตัวอย่างเช่น ค่า <Fx4> เมื่อ $nFx=12$ (Fx มีทั้งหมด 12 ตัว) จะหาค่า <Fx4> ได้จากรูปที่ 73 ในการใช้งานผู้ใช้ต้องกำหนด tag function ก่อน การเปลี่ยนมาใช้ tag function สามารถทำได้ เช่น

$$P_1: S(n,x) :n \geq 1 \rightarrow F(a_n x^m + \dots + a_2 x^2 + a_1 x^1 + a_0) R(b_n x^n + \dots + b_2 x^2 + b_1 x^1 + b_0) S(n-1, x-0.1)$$

$$P_{1\text{-tagged}}: S(n) :n \geq 1 \rightarrow \langle Fx \rangle \langle Rx \rangle S(n-1)$$

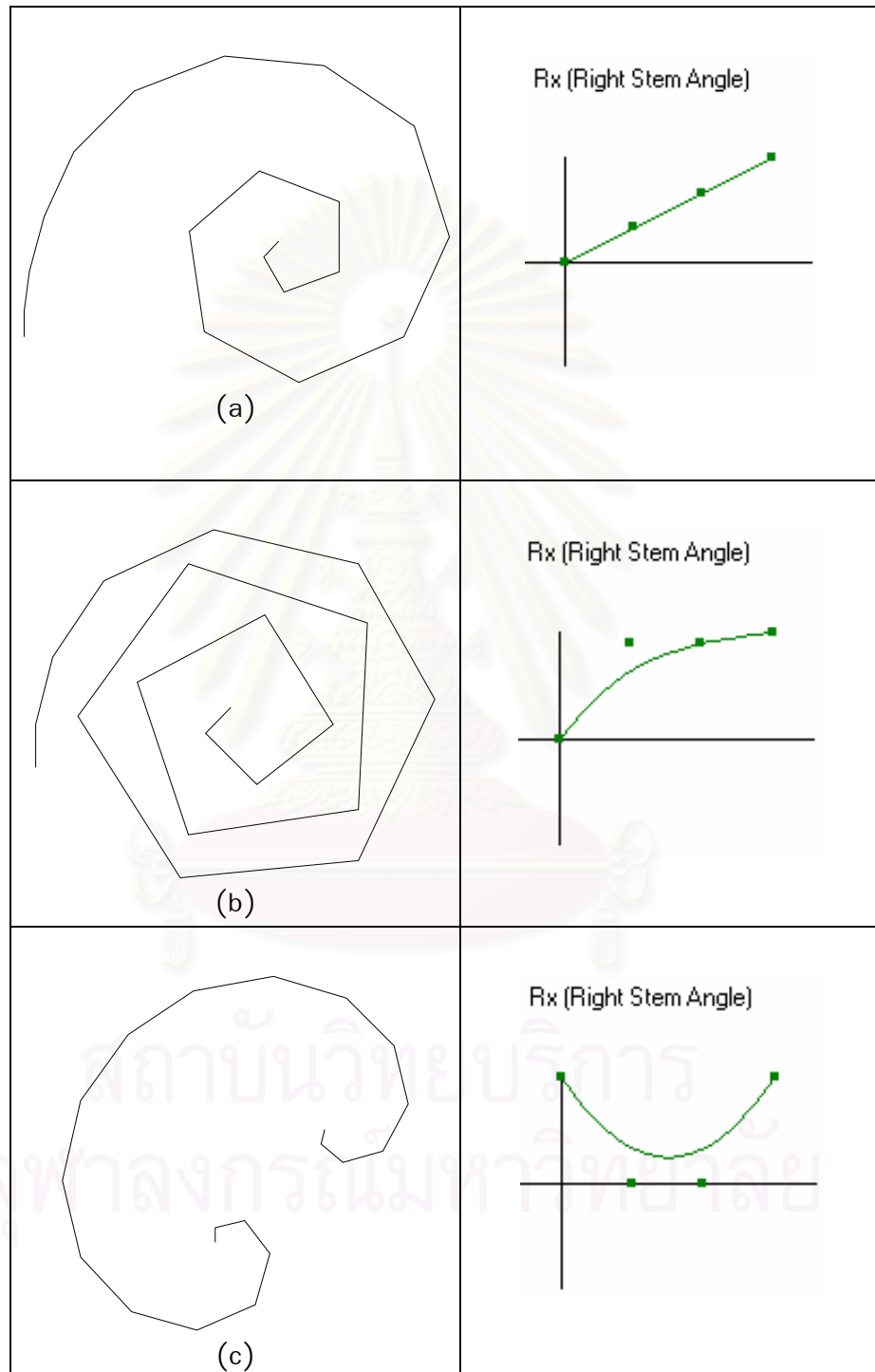
(4.3)

ในกรณีนี้ Fx แทนคำสั่ง F (ลากเส้นตรง) และ Rx แทนคำสั่ง R (หมุน) หลังจากผ่าน L-parser แบบพิเศษแล้วจะได้ชุดคำสั่งที่ประกอบด้วย tag function ที่มีตัวเลขต่อท้ายโดยอัตโนมัติ โดยปกติตัวเลขจะเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 เช่น $\langle Fx \rangle \langle Rx \rangle \langle Fx \rangle$ หลังเดิมจะได้ $\langle Fx1 \rangle \langle Fx2 \rangle \langle Fx3 \rangle$ สำหรับการเติมตัวเลขที่เกิดจาก L-parser แบบพิเศษนี้จะกล่าวถึงในส่วนถัดไป

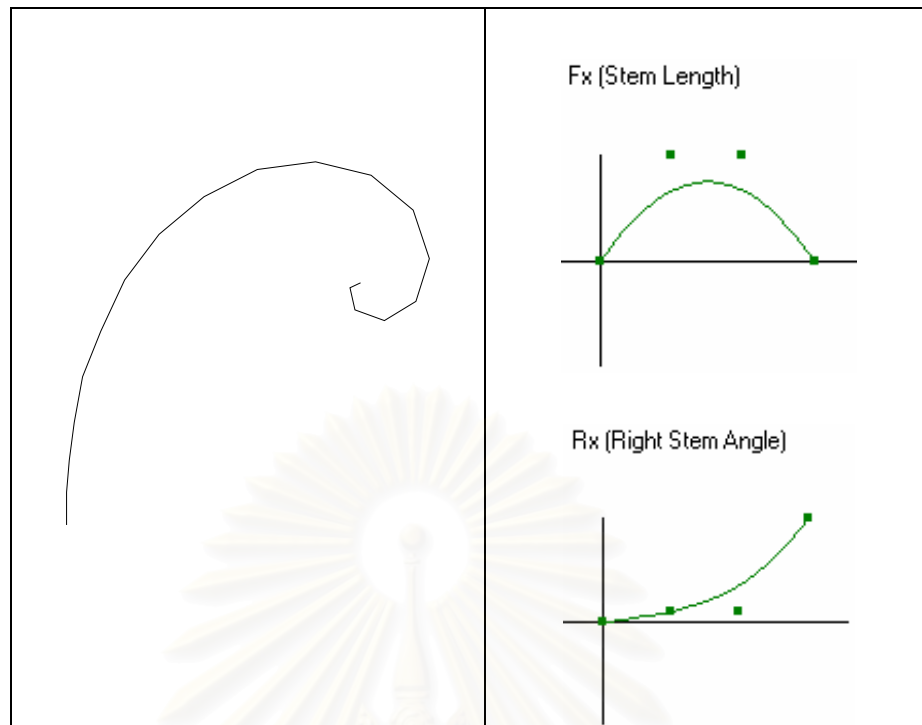
ตาราง 3 แสดงการคำนวณเส้นโค้งโดยใช้ tag function

รอบที่	ผลที่ได้
1	$\langle Fx1 \rangle \langle Rx1 \rangle S(19)$
2	$\langle Fx1 \rangle \langle Rx1 \rangle \langle Fx2 \rangle \langle Rx2 \rangle S(18)$
3	$\langle Fx1 \rangle \langle Rx1 \rangle \langle Fx2 \rangle \langle Rx2 \rangle \langle Fx3 \rangle \langle Rx3 \rangle S(17)$
..	..
20	$\langle Fx1 \rangle \langle Rx1 \rangle \langle Fx2 \rangle \langle Rx2 \rangle \langle Fx3 \rangle \langle Rx3 \rangle \langle Fx4 \rangle \langle Rx4 \rangle \langle Fx5 \rangle \langle Rx5 \rangle \langle Fx6 \rangle \langle Rx6 \rangle \langle Fx7 \rangle \langle Rx7 \rangle \langle Fx8 \rangle \langle Rx8 \rangle \langle Fx9 \rangle \langle Rx9 \rangle \langle Fx10 \rangle \langle Rx10 \rangle \langle Fx11 \rangle \langle Rx11 \rangle \langle Fx12 \rangle \langle Rx12 \rangle \langle Fx13 \rangle \langle Rx13 \rangle \langle Fx14 \rangle \langle Rx14 \rangle \langle Fx15 \rangle \langle Rx15 \rangle \langle Fx16 \rangle \langle Rx16 \rangle \langle Fx17 \rangle \langle Rx17 \rangle \langle Fx18 \rangle \langle Rx18 \rangle \langle Fx19 \rangle \langle Rx19 \rangle \langle Fx20 \rangle \langle Rx20 \rangle S(0)$

เนื่องจาก tag function เป็น spline curve การควบคุมจึงทำได้โดยลากจุดควบคุม ตามต้องการ ตัวอย่างเช่นฟังก์ชัน Rx ควบคุมองศาระหว่างเส้นเมื่อฟังก์ชันมีความสูงมากจะมีองศาของการหมุนมาก เมื่อขยับให้ Rx เปลี่ยนรูปร่างไป เส้นที่ได้ก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย (รูปที่ 74) เมื่อให้ Rx มีค่าความชันที่แตกต่างกันเส้นโค้งมันบริเวณปลายมีลักษณะต่างกัน (รูปที่ 74-a, รูปที่ 74-b) ถ้าให้ Rx มีค่ามากทั้งสองข้าง ทำให้ปลายทั้งสองมันทั้งสองข้าง (รูปที่ 74-c) การควบคุมฟังก์ชันต่างๆ สามารถทำได้พร้อมกัน เช่น ฟังก์ชัน Fx ควบคุมความยาวของเส้น เมื่อความสูงของฟังก์ชันมากเส้นก็จะยาวมาก ทำให้เส้นโค้งนี้มีเส้นตรงกลางยาวกว่าส่วนปลายทั้งสองข้าง และใช้ร่วมกับฟังก์ชัน Rx ด้วย (รูปที่ 75)



รูปที่ 74 เส้นโค้งควบคุมด้วย tag function



รูปที่ 75 เส้นโค้งควบคุมด้วย tag function 2 ฟังก์ชันพร้อมกัน

4.2.1 ประโยชน์ของ Tag Functions

tag function มีข้อดีคือ ลวดรูปของสมการที่ซับซ้อนไปอยู่ในรูปของสมการ spline curve ควบคุมด้วยพารามิเตอร์เพียง 4 ตัว ช่วยลดเวลาได้มากขึ้น เนื่องจากการปรับพารามิเตอร์บน tag function ไม่ต้องให้ L-parser ใน L-systems ทำงานเพื่อคำนวณซ้ำเพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ใหม่ การปรับพารามิเตอร์ของ tag function สื่อความหมายได้ง่ายกว่า ลัมประสิทธิภาพของสมการธรรมดา และชุดคำสั่งที่ใช้ tag function สั้นกว่า

4.2.2 ประเภทของ Tag Functions

ประกอบด้วย tag function 2 แบบคือ m-Type และ n-Type

4.2.2.1 m-Type

ในแบบ m-Type เพิ่มตัวเลขจากซ้ายไปขวา เพิ่มขึ้นทีละ 1 ในแต่ละรอบของการวนซ้ำและกำหนดให้เริ่มต้นจาก 1 ในรอบต่อไป ในรอบที่ 1.0 B เปลี่ยนแปลงตามกฎ P_1 ทำให้ได้ผลลัพธ์คือ $\langle G \rangle \langle G \rangle \langle G \rangle \text{FB}$ และเมื่อ L-parser ตรวจพบ tag function $\langle G \rangle$ จึงเพิ่มตัวเลขเข้าไปใน tag นั้นและเพิ่มค่าของตัวเลขจนครบจำนวน ได้ผลลัพธ์คือ $\langle G1 \rangle \langle G2 \rangle \langle G3 \rangle \text{FB}$ ในรอบที่ 1.1 ถือว่าครบการทำงาน 1 รอบใหญ่ของ L-parser ในรอบต่อมา 2.0 , B เปลี่ยนแปลงตามกฎ P_1 ทำให้ได้ ผลลัพธ์คือ $\langle G1 \rangle \langle G2 \rangle \langle G3 \rangle \text{F} \langle G \rangle \langle G \rangle \langle G \rangle \text{FB}$ ต่อมาเมื่อ L-parser ตรวจพบ tag function $\langle G \rangle$ จึงเพิ่มตัวเลขเข้าไปใน tag นั้น โดยเริ่มนับจาก 1 จนครบจำนวน

<p>Rules:</p> <p>$\omega: A \rightarrow B$</p> <p>$P_1: B \rightarrow \langle G \rangle \langle G \rangle \langle G \rangle FB$</p> <p>init: B</p> <p>1.0: $\langle G \rangle \langle G \rangle \langle G \rangle FB$</p> <p>1.1: $\langle G_1 \rangle \langle G_2 \rangle \langle G_3 \rangle FB$</p> <p>2.0: $\langle G_1 \rangle \langle G_2 \rangle \langle G_3 \rangle F \langle G \rangle \langle G \rangle \langle G \rangle FB$</p> <p>2.1: $\langle G_1 \rangle \langle G_2 \rangle \langle G_3 \rangle F \langle G_1 \rangle \langle G_2 \rangle \langle G_3 \rangle FB$</p>
--

(4.4)

4.2.2.2 n-Type

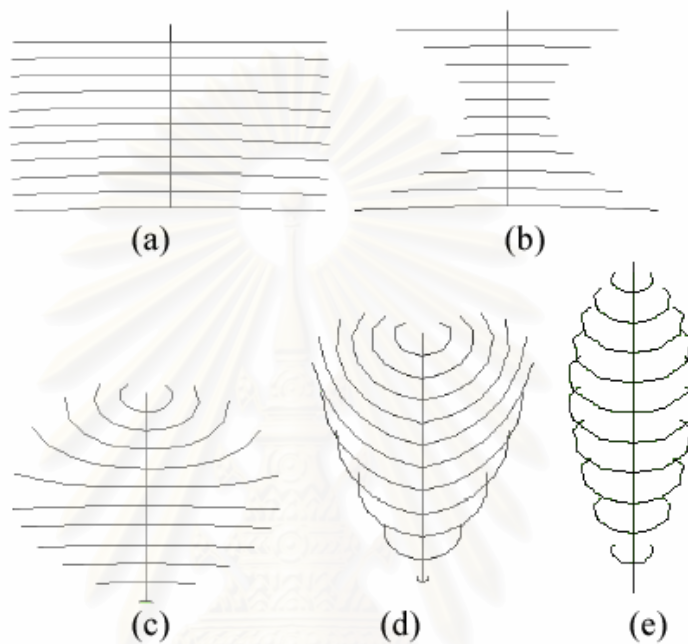
ในแบบ n-Type เติมตัวเลขจากซ้ายไปขวาตาม จำนวนรอบของการวนซ้ำโดยเพิ่มขึ้นตาม จำนวนรอบ ในรอบที่ 1.0 B เปลี่ยนแปลงตามกฎ P_1 ทำให้ได้ผลลัพธ์คือ $\langle S \rangle \langle S \rangle FB$ และเมื่อ L-parser ตรวจสอบ tag function $\langle S \rangle$ จึงเติมตัวเลขเข้าไปใน tag นั้นแต่ไม่เพิ่มค่าของตัวเลข ได้ผลลัพธ์คือ $\langle S_1 \rangle \langle S_1 \rangle FB$ ในรอบที่ 1.1 ถือว่าครบการทำงาน 1 รอบใหญ่ของ L-parser ในรอบต่อมา 2.0 , B เปลี่ยนแปลงตามกฎ P_1 ทำให้ได้ ผลลัพธ์คือ $\langle S_1 \rangle \langle S_1 \rangle F \langle S \rangle \langle S \rangle FB$ ต่อมา L-parser จึงเพิ่มค่าตัวเลขให้เป็น 2 และตรวจสอบ tag function $\langle S \rangle$ จึงเติมตัวเลขเข้าไป ใน tag นั้น

<p>Rules:</p> <p>$\omega: A \rightarrow B$</p> <p>$P_1: B \rightarrow \langle S \rangle \langle S \rangle FB$</p> <p>init: B</p> <p>1.0: $\langle S \rangle \langle S \rangle FB$</p> <p>1.1: $\langle S_1 \rangle \langle S_1 \rangle FB$</p> <p>2.0: $\langle S_1 \rangle \langle S_1 \rangle F \langle S \rangle \langle S \rangle FB$</p> <p>2.1: $\langle S_1 \rangle \langle S_1 \rangle F \langle S_2 \rangle \langle S_2 \rangle FB$</p>
--

(4.5)

4.3 โครงสร้างแกนใบไม้

จุดมุ่งหมายของการสร้างโครงสร้างสำหรับใบไม้แบบอัตโนมัติคือการสร้างกฎที่เหมาะสมสำหรับใบไม้รูปร่างต่างๆ กันโดยโครงสร้างเหมาะสมพอดีกับรูปร่างของขอบใบไม้ โครงสร้างของใบกำหนดให้มีเส้นใบหลักและเส้นใบย่อย และโครงสร้างสามารถปรับเปลี่ยนให้อยู่ในรูปร่างต่างๆ ได้ (รูปที่ 76) ใบที่ใช้ทดสอบคือใบยางพารา (รูปที่ 77)

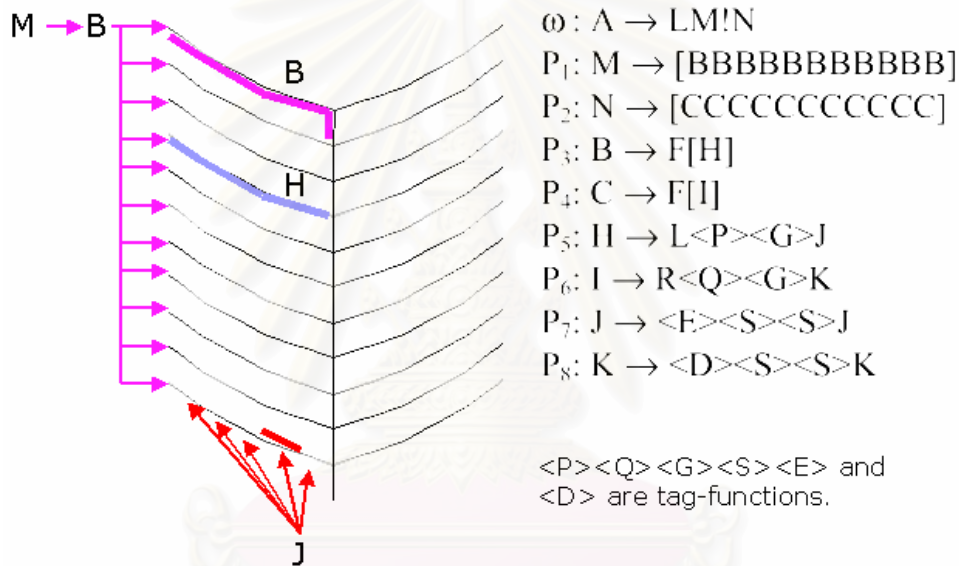


รูปที่ 76 โครงสร้างใบไม้ ใช้กฎ L-systems เดียวกัน ปรับพารามิเตอร์ต่างๆ กัน



รูปที่ 77 ใบต้นยางพารา(a) และเส้นขอบใบ(b)

โครงสร้างของใบไม้ นั้นแบ่งออกเป็นสองส่วนคือด้านซ้ายแทนด้วยสัญลักษณ์ M และ ด้านขวาแทนด้วยสัญลักษณ์ N (รูปที่ 78) M แทนด้วยเส้นใบอันดับที่หนึ่ง (F) และเส้นใบอันดับที่สองแทนด้วยสัญลักษณ์ B ; ในแต่ละส่วนของ B แบ่งย่อยออกเป็น H และ J ตามลำดับ ; การควบคุมมุมมองระหว่างเส้นใบทั้งสองระดับใช้ <P> และ <Q> ; ความยาวของเส้นใบอันดับที่สองควบคุมด้วย <G> ; การควบคุมความยาวระหว่างตรงกลางกับขอบใบทำได้โดย <S> ; ส่วน <E> และ <D> เป็นการควบคุมมุมมองภายในระหว่าง J ทำให้เกิดเส้นโค้ง B ; tag function <E> และ <D> เป็นฟังก์ชันผสม (ตาราง 4) ระหว่าง tag function L_1, L_2 และ L_3 เนื่องจากต้องการให้การปรับมุมในส่วนของปลายใบ กลางใบ และโคนใบ มีความแตกต่างกันได้ และต้องการความกลมกลืนกัน (รูปที่ 76c) ทำให้ส่วนปลายใบมีการม้วนมากกว่าส่วนกลางใบและโคนใบ



รูปที่ 78 กฎสำหรับสร้างใบไม้

init : LM!N
 1st : L[BB...B]![CC...C]
 2nd : L[F[H]F[H]...F[H]]![F[I]F[I]...F[I]]
 3rd : L[F[L<P₃><G₁>J]F[L<P₃><G₂>J]...F[L<P₃><G₁₁>J]]!
 [F[R<Q₃><G₁>K]F[R<Q₃><G₂>K]...F[R<Q₃><G₁₁>K]]
 4th : L[F[L<P₃><G₁><E><S₄><S₄>J].....]!
 [F[R<Q₃><G₁><D><S₄><S₄>K].....]
 5th : L[F[L<P₃><G₁><E><S₄><S₄><E><S₅><S₅>J].....]!
 [F[R<Q₃><G₁><D><S₄><S₄><D><S₅><S₅>K].....]
 ...
 8th : ...

รูปที่ 79 กฎสำหรับสร้างใบไม้ในรูปแบบ tag function

ตาราง 4 แสดง tag function ที่ใช้สร้างใบไม้ ประกอบด้วย S,P,Q,G,D และ E ตัว m และ n ที่ตามหลังชื่อฟังก์ชันเป็นลักษณะการเพิ่มค่าของ tag function นั้น (ตาม 4.2.2) ค่าของฟังก์ชัน S,G มีช่วงอยู่ระหว่าง 0.0 ถึง 1.0 เนื่องจากเป็นอัตราส่วนของความยาวของเส้น ส่วนค่าของฟังก์ชัน P,Q,D,E นั้นมีช่วงอยู่ระหว่าง 0.0 - 90.0 (ได้จากกรนำ 90 ไปคูณ) เนื่องจากเป็นค่าของมุมมองสำหรับการหมุน ฟังก์ชัน D และ E มีลักษณะพิเศษคือมีการเติมตัวเลขทั้งสองแบบ เช่น <D1,1>

ตาราง 4 สัญลักษณ์ tag function และความหมาย

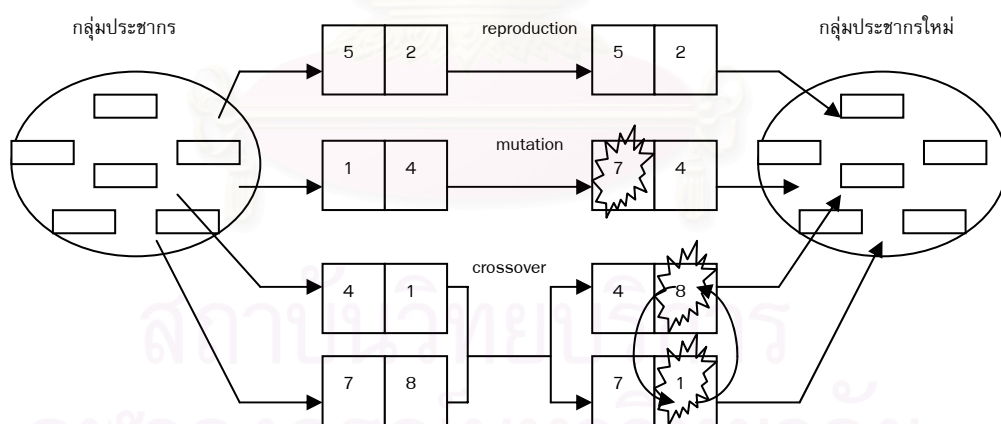
Tag - Function	Meanings	Output Range
<S _n >	$\gamma = S(n)$	0.0 - 1.0
<P _n >	Turn left by P (n) angle	0.0 - 90.0
<Q _n >	Turn right by Q (n) angle	0.0 - 90.0
<G _m >	$\gamma = G(m)$	0.0 - 1.0
<D _{m,n} >	$\sigma = \ m\ $ $\theta = \begin{cases} (1-2\sigma)L_1(n) + 2\sigma L_2(n) \\ \text{where } 0 \leq \sigma \leq 0.5 \\ 2(1-\sigma)L_2(n) + (2\sigma-1)L_3(n) \\ \text{where } 0.5 < \sigma \leq 1 \end{cases}$ Turn left by θ angle	0.0 - 90.0
<E _{m,n} >	Same as <D _{m,n} >, but turn right by θ angle	0.0 - 90.0

4.4 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นวิธีการหนึ่งสำหรับช่วยในการค้นหาคำตอบโดยอัตโนมัติ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้นได้เลียนแบบการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต โดยอาศัยแนวคิดของทฤษฎีเชิงวิวัฒนาการคือสิ่งมีชีวิตที่เหมาะสมกว่ามีโอกาสอยู่รอดและเพิ่มจำนวนมากกว่าสิ่งมีชีวิตที่มีความเหมาะสมต่อสภาพแวดล้อมน้อยกว่า การคัดเลือกโดยธรรมชาตินี้เป็นไปโดยอัตโนมัติ สิ่งมีชีวิตที่ปรับตัวไม่ได้ หรือมีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมน้อยกว่าต้องลดจำนวนลงเนื่องจากการขาดอาหาร ปัจจัยในการดำรงชีวิตและอื่นๆ ส่วนสิ่งมีชีวิตกลุ่มที่ปรับตัวได้ดีหรือเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมมากกว่าก็จะได้ปัจจัยในการดำรงชีวิตที่มากกว่า ทำให้เพิ่มจำนวนขึ้นมาแทนที่สิ่งมีชีวิตที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมน้อยกว่า การเพิ่มจำนวนมีหลายแบบ เช่น การแบ่งเซลล์ที่ได้หน้าตาเหมือนต้นฉบับเดิม (reproduction) การจับคู่เลือกกันเองภายในกลุ่มตั้งแต่สองตัวขึ้นไป (crossover) มีปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการผ่าเหล่า (mutation) จากรุ่นหนึ่งไปสู่อีกรุ่นหนึ่ง แม้ว่าการเกิดการผ่าเหล่านี้อัตราส่วนน้อยแต่เมื่อเกิดการผ่าเหล่าแล้วจะได้

สิ่งมีชีวิตกลุ่มใหม่ที่มีลักษณะคล้ายกลุ่มเดิม มีโอกาสที่สิ่งมีชีวิตที่ผ่าเหล่าจะมีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมมากกว่ากลุ่มเดิม ดังนั้นเมื่อสิ่งมีชีวิตกลุ่มหนึ่งวิวัฒนาการไประยะเวลาหนึ่ง สิ่งมีชีวิตที่อยู่รอดในรุ่นหลังจะมีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมมากกว่ารุ่นแรก

การนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาใช้สำหรับหาคำตอบนั้นทำได้โดยกำหนดให้คำตอบมีบทบาทเดียวกับสิ่งมีชีวิต เรียกว่าประชากร (individual) เริ่มต้นประชากรแต่ละตัวจะมีรหัสแบบสุ่ม (แทนรหัสพันธุกรรมหรือยีน) และมีตัววัดเป็นดัชนีว่าประชากรนั้นเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมเท่าไร และค่าความเหมาะสมที่วัดได้นั้นเป็นตัวกำหนดว่า ประชากรนี้จะมีโอกาสอยู่รอดเพื่อสร้างประชากรรุ่นต่อไปเท่าไร การเลือกประชากรเพื่อสร้างประชากรรุ่นต่อไปนั้นเลือกจากการสุ่มตามค่าโอกาสของความอยู่รอดเพื่อการสร้างประชากรรุ่นใหม่ โดยวิธีที่นิยมใช้มีอยู่สามวิธี คือ 1) reproduction คัดลอกประชากรเหมือนกับต้นฉบับทุกประการ 2) mutation คัดลอกประชากรต้นฉบับและสุ่มจุดเปลี่ยนแปลงค่าบางค่าในประชากรนั้นในรุ่นต่อไป และ 3) crossover เลือกประชากรสองตัวเป็นต้นฉบับและสุ่มจุดตัดสลับส่วนหัวท้าย วิธีนี้สร้างประชากรสองตัวในรุ่นต่อไป เมื่อสร้างกลุ่มประชากรครบตามจำนวนที่ต้องการแล้ว กลุ่มประชากรรุ่นเก่าที่เป็นต้นฉบับจะลบทิ้งไป และนำกลุ่มประชากรรุ่นใหม่มาทดแทน จากนั้นวนซ้ำขั้นตอนวิธีคือ เริ่มหาค่าความเหมาะสมของประชากรแต่ละตัว และสร้างประชากรรุ่นต่อไป จนกว่าจะพบประชากรตัวใดตัวหนึ่งที่มีค่าความเหมาะสมมากพอตามความต้องการ หรือครบจำนวนรอบที่กำหนด (รูปที่ 80)

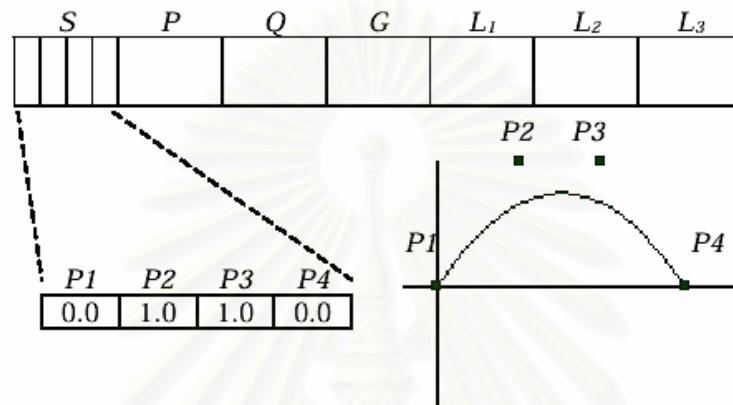


รูปที่ 80 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

เมื่อสร้างประชากรไปหลายๆ รุ่น ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมพบว่า ประชากรรุ่นหลังๆ จะถูกปรับปรุงให้มีคุณภาพดีกว่าประชากรรุ่นแรกเนื่องจากขั้นตอนการคัดเลือกเชิงพันธุกรรม ดังนั้นขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจึงเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้หาคำตอบหรือพารามิเตอร์ที่ต้องการได้อย่างอัตโนมัติ

4.5 การทดลอง

สำหรับการทดลองนี้ ประชากรในการทดลองคือ tag function ที่ใช้สร้างใบไม้ ประกอบด้วย ฟังก์ชัน S,P,Q,G,D และ E เมื่อ D และ E เป็นฟังก์ชันผสมของฟังก์ชัน L_1, L_2 และ L_3 ทำให้มี tag function ทั้งหมด 7 ฟังก์ชันคือ S,P,Q,G, L_1, L_2 และ L_3 (รูปที่ 81) เมื่อ tag function แต่ละตัว ใช้ค่าควบคุมทั้งหมด 4 ค่า ดังนั้นการกำหนดประชากร 1 ตัวในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ประกอบด้วยค่าจำนวนจริงทั้งหมด $7*4 = 28$ ตัวแปร



รูปที่ 81 การเข้ารหัส tag function สำหรับการทดลอง

4.5.1 Genetic Parameters

พารามิเตอร์สำหรับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีดังนี้

Number of Individual	200
Reproduction Rate	20%
Crossover Rate	40%
Mutation Rate	40%
Number of Generation	200

4.5.2 Fitness Function

การวัดค่าความเหมาะสมวัดจากเส้นรอบรูปตามสมการ

$$Fitness = \sum_i^n (x_i^t - x_i^s) \quad (4.1)$$

เมื่อ x_i' คือเซตของจุดในเส้นขอบของภาพเป้าหมาย และ x_i'' คือเซตของจุดในเส้นขอบของภาพที่ประชากรสร้างขึ้นมา n คือจำนวนจุดทั้งหมดของเส้นขอบ ค่าความเหมาะสมนี้เมื่อมีค่าน้อย แสดงว่าภาพที่ได้มีความใกล้เคียงกับภาพต้นฉบับมากกว่า ภาพที่มีค่าความเหมาะสมมาก ดังนั้นประชากรตัวที่มีค่าความเหมาะสมน้อยกว่าเป็นประชากรที่ดีกว่า

รายละเอียดของการคำนวณค่าความเหมาะสมมีดังนี้

1. คำนวณหาจุดด้านซ้ายของภาพต้นฉบับ (รูปที่ 82-A) ตามรหัสเทียม Do the Left Side จะได้ตัวแปร XLeft เป็นแถวลำดับที่เก็บตำแหน่งจุดด้านซ้ายของภาพ เมื่อวาด XLeft จะมีลักษณะของเส้นตามรูปที่ 82-B,C

```

Do the Left Side

for y = 1 to height
for x = 1 to width
  if pixel( x,y ) is not white then
    XLeft[y] = x
    break loop x
  end if
next x
next y

```

2. คำนวณหาจุดด้านขวาของภาพทั้งหมด (รูปที่ 82-D,E) ตามรหัสเทียม Do the Right Side จะได้ตัวแปร XRight เป็นแถวลำดับที่เก็บตำแหน่งจุดด้านขวาของภาพ

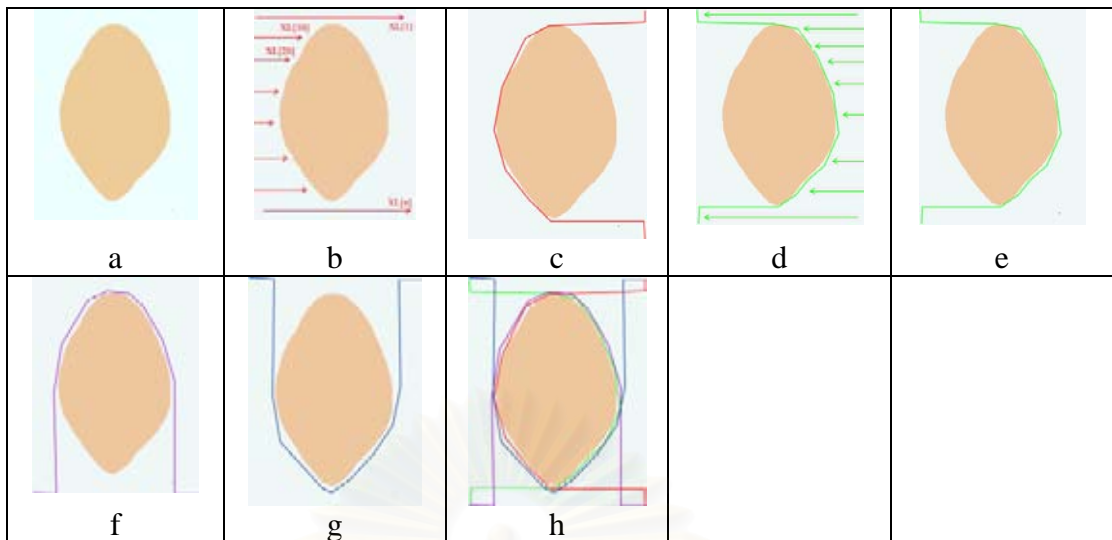
```

Do the Right Side

for y =1 to height
for x =width to 1 step -1
  if pixel( x,y ) is not white then
    XRight[y] = x
    break loop x
  end if
next x
next y

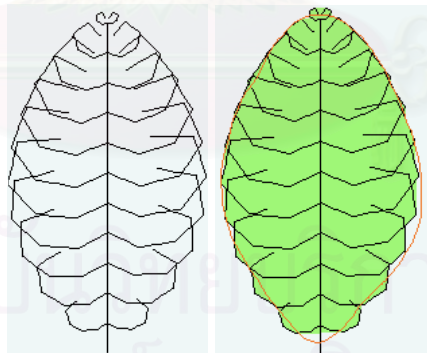
```

3. คำนวณหาจุดด้านบนและล่างของภาพ (รูปที่ 82-F,G) จะได้ตัวแปร YUp และ YDown เป็นแถวลำดับที่เก็บตำแหน่งจุดด้านบนและล่างของภาพ ตามลำดับ



รูปที่ 82 การหาเส้นขอบของภาพ

4. จะได้ตัวแปรคือ XLeft, XRight, YUp, YDown ที่เก็บเส้นขอบทั้งหมดของภาพต้นฉบับ หรือ x_i' (รูปที่ 82-H) วิธีนี้สามารถใช้ได้กับภาพเว้าออก (Convex Shape)
5. คำนวณตัวแปรทั้งสี่ กับภาพเป้าหมายที่ต้องการเปรียบเทียบ ใช้วิธีเดียวกันจะได้ จะได้ตัวแปรคือ XLeft_output, XRight_output, YUp_output, YDown_output ที่เก็บเส้นขอบทั้งหมดของภาพที่ต้องการเปรียบเทียบ หรือ x_i^s (รูปที่ 83)



รูปที่ 83 ภาพเป้าหมายที่ต้องการเปรียบเทียบ (ซ้าย) การเปรียบเทียบต้นฉบับและภาพเป้าหมาย (ขวา)

6. เปรียบเทียบภาพทั้งสองด้วยการนำตัวแปรทั้งสี่มาลบกันหาค่าความแตกต่างสะสม ตามรหัสเทียม Sum Difference จะได้ตัวแปร sum_diff เป็นตัวแปรแสดงดัชนีความแตกต่าง เมื่อมีค่ามากแสดงว่าภาพทั้งสองมีความแตกต่างกันมาก เมื่อมีค่าน้อยแสดงว่ามีความแตกต่างกันน้อย

```

Sum Difference

sum_diff = 0

for y = 1 to height
  sum_diff = sum_diff +
  absolute ( XLeft[ y ] - XLeft_output[ y ] ) +
  absolute ( XRight[ y ] - XRight_output[ y ] )
next y

for x = 1 to width
  sum_diff = sum_diff +
  absolute ( YUp[ x ] - YUp_output[ x ] ) +
  absolute ( YDown[ x ] - YDown_output[ x ] )
next x

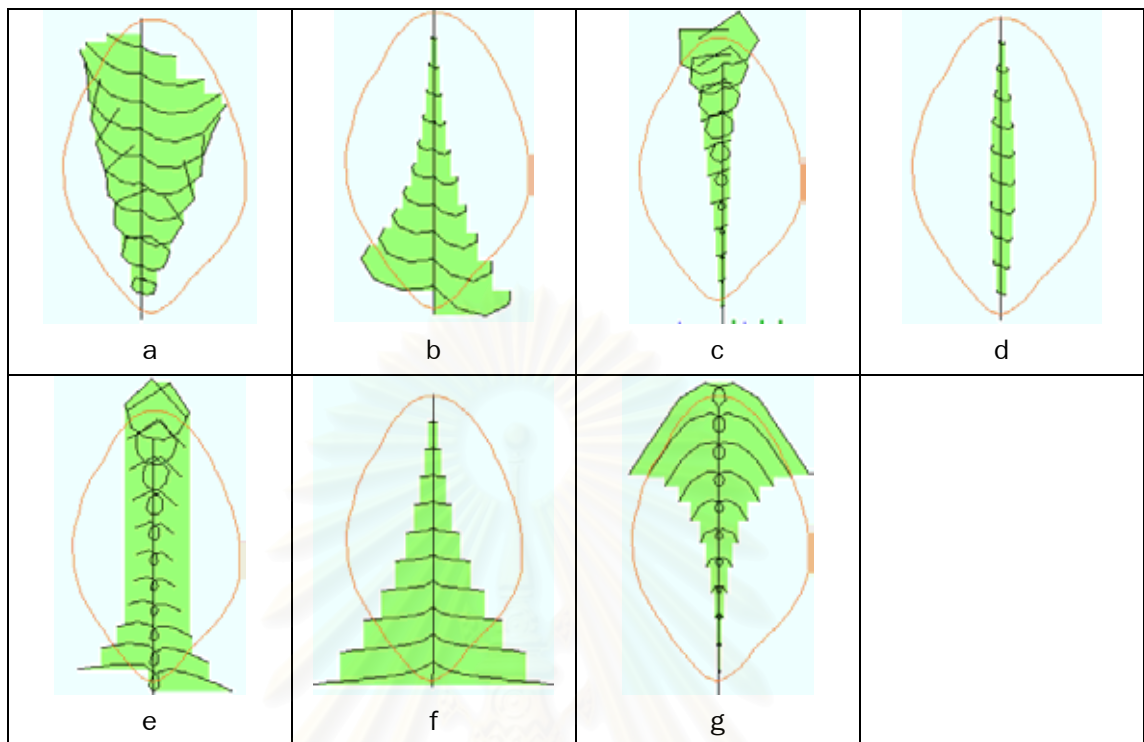
sum_diff = sum_diff / fraction
( make sum_diff's range between [0..100] for fitness
  calculation )

```

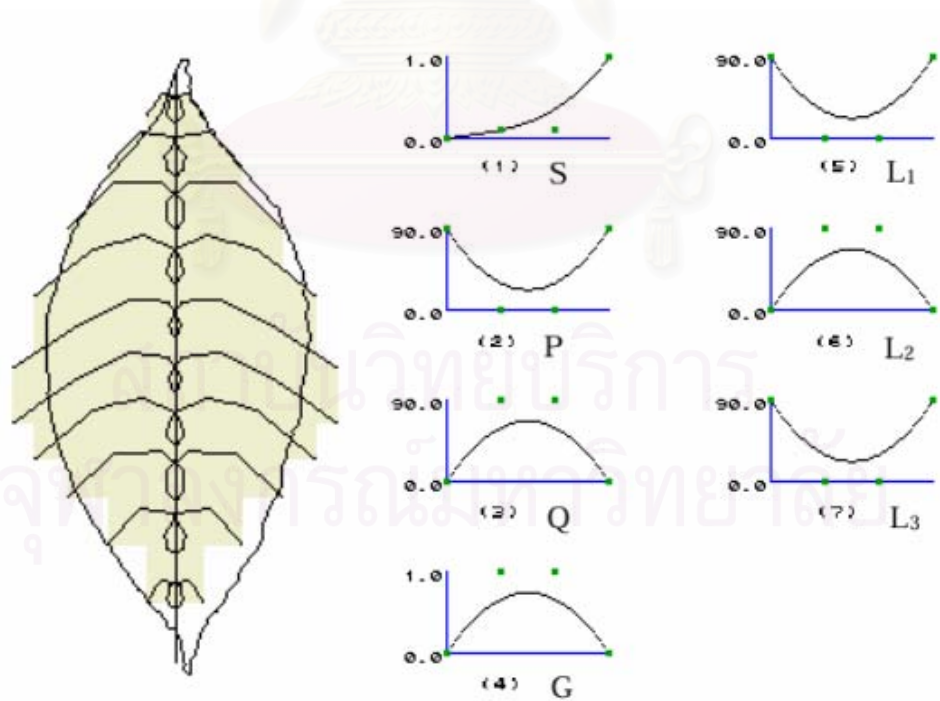
4.6 ผลการทดลอง

เส้นขอบสีแดงแสดงใบไม้เป้าหมายที่ต้องการ เส้นโครงและส่วนที่ระบายสีเขียวทึบคือส่วนที่สร้างจาก L-systems (รูปที่ 84) ผลที่ได้จากประชากรรุ่นแรกมีลักษณะแตกต่างกันอย่างมาก บางส่วนมีการม้วนงอเข้าหากัน บางส่วนมีด้านโคนใบกว้างกว่า ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดที่รุ่นแรก (รูปที่ 85) ยังไม่ดีขึ้นเนื่องจากมีเส้นใบบริเวณส่วนกลางเกินออกมา และมีเส้นใบโค้งลง เมื่อปล่อยให้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมทำงานจนครบ 200 รุ่น ใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมงกว่า บนเครื่อง Pentium 667Mhz ผลลัพธ์ที่ได้ (รูปที่ 86) เป็นที่น่าพอใจคือมีเส้นใบโค้งขึ้นไปทางปลายใบ และเส้นใบแผ่กระจายเต็มพื้นที่

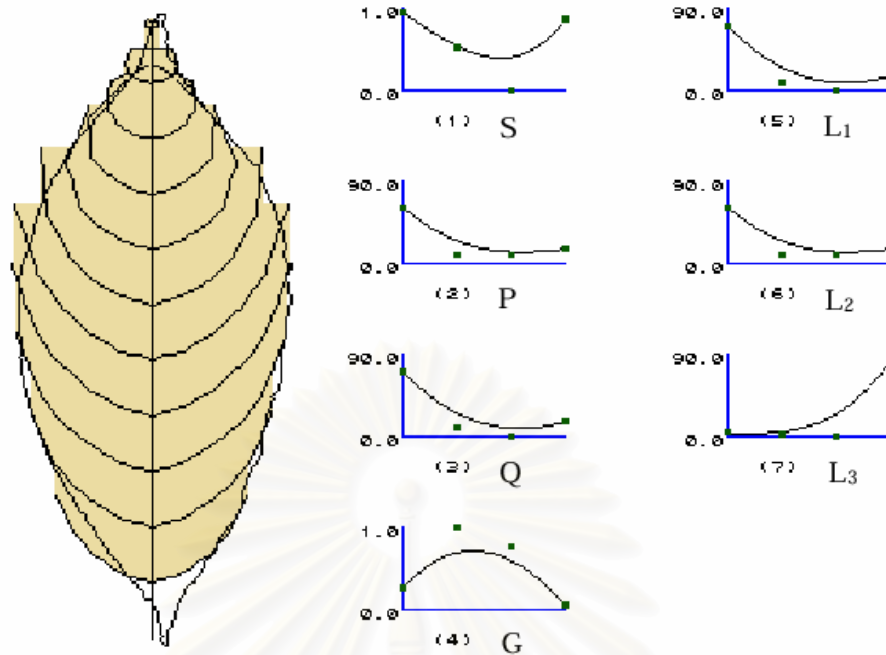
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 84 ตัวอย่างประชากรรุ่นแรก



รูปที่ 85 ประชากรตัวที่ดีที่สุดในเรื่องที่ 1



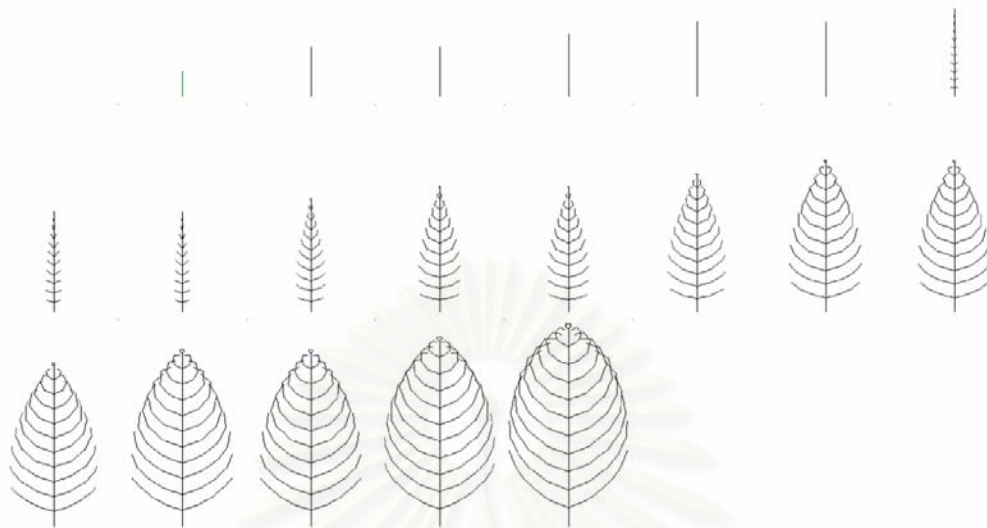
รูปที่ 86 ประชากรตัวที่ดีที่สุดในรอบที่ 200

งานวิจัยต่อมาในปี 2002 Modeling Leaf Shapes using L-systems and Genetic Algorithms โดย Y. Rodkaew, S. Siripant, C. Lursinsap, P. Chongstitvatana, T. Fujimoto and N.Chiba ได้ปรับปรุงผลลัพธ์ที่ได้ และเพิ่มเติมสีของใบไม้จากงานเดิมของ N. Chiba, K. Ohshida, K. Muraoka and N. Saito, "Visual simulation of Leaf Arrangement and Autumn Colours" ในปี 1996 (รูปที่ 87)



รูปที่ 87 แบบจำลองใบไม้ปรับพารามิเตอร์ด้วยขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม

ที่มา: (Y. Rodkaew, S. Siripant, C. Lursinsap, P. Chongstitvatana, T. Fujimoto and N.Chiba 2002)



รูปที่ 88 การขยายขนาดของใบไม้

ภาพการขยายขนาดของใบไม้ (รูปที่ 88) ใช้การควบคุมรูปร่างโดย tag function และพารามิเตอร์ที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม แต่ละภาพสร้างจากการวนซ้ำใน L-systems ที่ละขั้นตอนตั้งแต่รอบแรกจนถึงรอบสุดท้าย เนื่องจากการหาค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของระยะความยาวตำแหน่งและค่ามุมมอง ที่อยู่ระหว่างรอบของการวนซ้ำด้วย ทำให้ภาพมีความกลมกลืนและจำนวนภาพที่ได้มีมากกว่าจำนวนรอบของการวนซ้ำ

4.7 สรุป

เนื่องจาก L-systems ได้รับความนิยมสูงสำหรับสร้างแบบจำลองพืชในงานวิจัยต่างๆ ดังนั้นการสร้างแบบจำลองใบไม้ด้วย L-systems จึงเป็นส่วนสำคัญในการสร้างแบบจำลองพืชสำหรับการนำ L-systems มาใช้สร้างใบไม้นั้น มีข้อสังเกตคือ ต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญในการสร้างกฎเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง และกฎดังกล่าวนี้มีความซับซ้อนเนื่องจากการเขียนกฎที่ต้องใช้วิธีการวนซ้ำ และมีตัวแปรพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นต้องค้นหาและปรับให้เข้ากับกฎที่ได้สร้างขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมโครงสร้างนั้นมีจำนวนมาก แม้ว่าการแก้ไขปัญหานั้นนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาช่วยปรับพารามิเตอร์แล้วก็ตาม แต่การนำพารามิเตอร์มาใช้แทนกลุ่มของตัวเลขจำนวนมากสำหรับอธิบายตำแหน่ง ขนาด และทิศทางของโครงสร้างใบไม้ เมื่อโครงสร้างมีความซับซ้อนมากขึ้นทำให้จัดรูปแบบให้อยู่ในรูปของสมการได้ยากขึ้น การนำ L-systems มาใช้นั้นอาจไม่ใช่ทางเลือกที่ดีที่สุด

บทที่ 5

การสร้างแบบจำลองใบไม้ด้วยระบบขนส่งอนุภาค

Prometheus, according to Greek mythology, was punished by Zeus for having stolen fire from the gods and given it to man. It is fortunate that Zeus did not feel similarly disposed toward plants, which have been "stealing" sunlight and converting it to their own use almost since the beginning of life on earth. Energy is required by all living organisms in order to build and maintain their complex structures. .. Leaves, the site of photosynthesis in most higher plants, are uniquely designed for the efficient absorption of light and CO₂ ..

--- William G. Hopkins (1999:123)
Introduction to Plant Physiology

จากบทที่ 4 การสร้างโครงสร้างด้วยวิธีการปรับพารามิเตอร์ภายใต้กฎที่กำหนดใน L-systems นั้นใช้เวลามากแม้ว่าจะเป็นการสร้างโครงสร้างเส้นใบเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการ เนื่องจากพีซีมีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนดังจะเห็นได้จากโครงสร้างของเส้นใบที่มีลักษณะแตกแขนงแบบโครงข่ายเป็นลำดับชั้น การให้ L-systems สร้างโครงสร้างโดยเปรียบเทียบโครงสร้างเส้นใบด้วย มีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มกฎของ L-systems และฟังก์ชันตัวแปรมากขึ้น ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่สะดวกถ้าเพิ่มข้อกำหนดมากขึ้นเท่ากับจะต้องมีตัวแปรมากขึ้นเป็นผลให้เวลาการใช้หาคำตอบที่ได้มากขึ้นหรือต้องการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นมาช่วยแก้ปัญหา ทำให้ขั้นตอนวิธีดังกล่าวนั้นเป็นวิธีที่ต้องการระยะเวลานานสำหรับการหาคำตอบที่เหมาะสม อีกทั้งขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหาต้องพึ่งคนเป็นผู้ปรับปรุงกฎ ซึ่งไม่เหมาะถ้าต้องการสร้างใบไม้ที่มีลักษณะแตกต่างกันเป็นจำนวนมาก

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงระบบขนส่งอนุภาค (Particle Transportation System) เป็นขั้นตอนวิธีใหม่ที่ได้ค้นพบจากการสังเกตลักษณะของเส้นใบและแรงบันดาลใจในทฤษฎีการสังเคราะห์แสงของใบไม้ตามธรรมชาติ ซึ่งได้นำมาประยุกต์เป็นขั้นตอนวิธีใหม่สำหรับสร้างโครงสร้างของเส้นใบด้วยระบบอนุภาค และทำให้สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาของตัวแปรและการกำหนดโครงสร้างที่ได้กล่าวมาแล้วคือ ในระบบนี้ไม่จำเป็นต้องมีกฎและโครงสร้างเริ่มต้นที่ซับซ้อน ใช้เวลาสร้างรวดเร็วกว่าและผลลัพธ์ที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับเส้นใบไม้ในธรรมชาติ

ระบบขนส่งอนุภาคทำงานโดยเริ่มต้นจากการกำหนดขอบเขตภายนอกของใบไม้ และกำหนดจุดเป้าหมายที่ขั้วใบ จากนั้นโปรยอนุภาคภายในขอบเขตที่กำหนด และให้อนุภาคเคลื่อนที่โดยกฎที่กำหนดคือการเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายที่กำหนดไว้และเคลื่อนที่ไปยังอนุภาคตัวที่ใกล้ที่สุด จะมีการรวมอนุภาคเข้าด้วยกันเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าใกล้กัน การทำงานจะสิ้นสุดเมื่ออนุภาคทุกตัวเคลื่อนที่ไปถึงเป้าหมาย การสร้างเส้นใบภายในรูปร่างของใบไม้ที่กำหนดจะสร้างขึ้นมาจากเส้นทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ระหว่างจุดตั้งต้นไปยังเป้าหมาย

เนื้อหาภายในบทประกอบด้วย สมมติฐานของการสร้างระบบขนส่งอนุภาคที่อาศัยหลักการขนส่งพลังงาน วิธีการขนส่งพลังงาน กฎการเคลื่อนที่ของอนุภาค การกำหนดรูปร่างของใบไม้ การจัดวางอนุภาค การปรับปรุงผลลัพธ์ที่ได้จากระบบให้มีความสมจริงมากยิ่งขึ้น ลักษณะของเส้นใบเมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ การเปรียบเทียบแบบจำลองใบไม้กับใบไม้จริง การสร้างสีและลวดลายของใบไม้

5.1 รูปแบบโครงสร้างของเส้นใบ

เส้นใบแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือเส้นใบแบบขนานของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว และเส้นใบแบบโครงตาข่ายของพืชใบเลี้ยงคู่ การสร้างแบบจำลองของเส้นใบแบบขนานสามารถสร้างได้โดยง่ายเนื่องจากเส้นใบขนานกับขอบใบ เช่นใบเตยหอม และในอีกแบบหนึ่งมีเส้นใบทางด้านขวาง เช่นใบกล้วย เส้นใบมีขนาดเล็กและละเอียดกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับพืชใบเลี้ยงคู่

หากพิจารณาเพียงเส้นใบหลักของพืชใบเลี้ยงคู่มีลักษณะการจัดเรียงคล้ายกับพืชใบเลี้ยงเดี่ยว แต่มีขนาดของเส้นใบใหญ่และหนากว่า มีเส้นใบย่อยเชื่อมต่อระหว่างเส้นใบหลัก ทั้งในลักษณะขนานและตั้งฉากกับเส้นใบหลัก หรือมีลักษณะของโครงตาข่ายเชื่อมต่อกัน

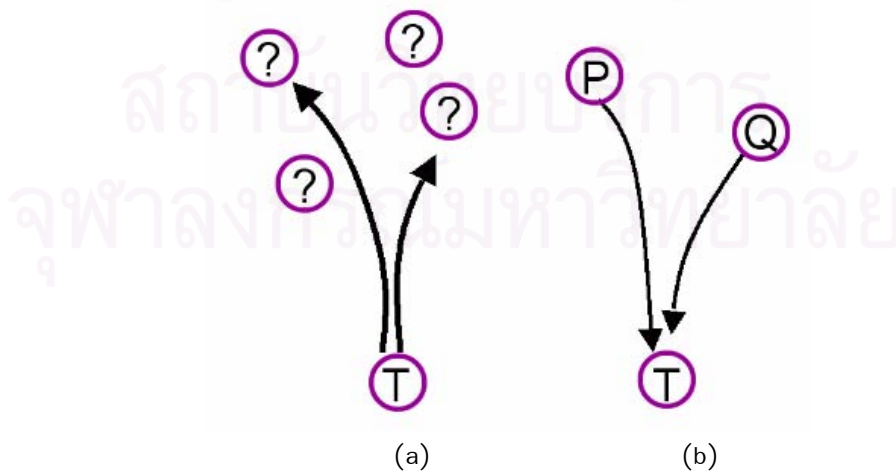
อาจกล่าวได้ว่าลักษณะโครงสร้างของเส้นใบขึ้นอยู่กับรูปแบบหรือมีความสัมพันธ์กับรูปร่างของใบ เส้นใบหลักอยู่บริเวณตรงกลางระหว่างขอบใบพอดี และล้อมรอบด้วยเส้นใบรองที่มีลักษณะของโครงตาข่ายที่ต่อเชื่อมกันเข้ากับรูปร่างของขอบใบได้อย่างเหมาะสม ในรูปแบบดังกล่าวมีความซับซ้อน มีลักษณะรูปแบบคล้ายกันแต่มีขนาดที่แตกต่างกัน รูปแบบการเชื่อมต่อนี้มีความน่าสนใจ มีลักษณะการแผ่กระจายทั่วถึงทั้งใบ มีแบบแผนการเชื่อมต่อที่แปลกประหลาดซับซ้อน

ทำให้การสร้างแบบจำลองดังกล่าวด้วยสมการไม่อาจสร้างได้โดยง่าย หรือใช้พารามิเตอร์ที่มีจำนวนน้อยได้ ดังนั้นการพิจารณาแต่เพียงรูปร่างของเส้นใบจึงไม่เกิดประโยชน์มากนัก จึงพิจารณาหน้าที่อื่นๆ ของเส้นใบ คือการช่วยพยุงให้ใบไม้คงรูปอยู่ได้ และเส้นใบทำหน้าที่เป็นท่อลำเลียง การที่เส้นใบแผ่กระจายและระหว่างเส้นใบกันพื้นที่ออกเป็นช่องเล็กๆ นั้น เส้นใบทำหน้าที่สำหรับแลกเปลี่ยนสารอาหารและน้ำและเชื่อมต่อระหว่างช่องเล็กๆ ทัวทั้งใบไม้ และท่อลำเลียงทั้งหมดรวมกันบริเวณส่วนโคนใบและเชื่อมต่อกับข้อใบ

5.2 การเคลื่อนที่แบบย้อนกลับ

ขั้นตอนวิธีการสร้างโครงสร้างของพืชโดยทั่วไปเริ่มต้นจากการงอกกิ่งไม้จากจุดเริ่มต้นและขยายออกไป แต่วิธีนี้ไม่อาจนำมาใช้กำหนดรูปร่างของการแผ่ขยายภายในใบไม้และสร้างเส้นใบที่เหมาะสมได้ เนื่องจากในช่วงแรกอนุภาคที่เคลื่อนที่ออกมาจากจุด T จะมีตำแหน่งใกล้เคียงกันหมด (รูปที่ 89a) การเคลื่อนที่ที่ออกจากแหล่งกำเนิด T โดยไม่ทราบแน่ชัดว่าจะต้องการเคลื่อนที่ไปยังจุดใด ทำให้มีความเป็นไปได้หลายทาง และการค้นหาว่าอนุภาคที่เคลื่อนที่ออกมานั้นแต่ละตัวควรไปยังจุดใดถึงจะเหมาะสม เมื่อใดควรแยกอนุภาคออกจากกัน จัดเป็นปัญหาที่ยาก

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงใช้วิธีการคำนวณย้อนกลับ (รูปที่ 89b) ในระบบขนส่งอนุภาคจึงกำหนดจุดต้นทาง P และปลายทาง T ขึ้นมา จากนั้นจึงคำนวณหาจุดที่เกี่ยวข้องกับจุดต้นทาง P ซึ่งก็คือจุด Q การปรับเปลี่ยนปัญหาให้อนุภาคเคลื่อนที่กลับทิศทางนี้ ทำให้ทราบได้ในทันทีว่าอนุภาคแต่ละตัวนั้นควรจะอยู่ที่ตำแหน่งใดบ้าง และจากการคำนวณการเคลื่อนที่ย้อนกลับได้ ทำให้ทราบได้ว่าอนุภาคแต่ละตัวควรจะรวมกันอย่างเหมาะสมที่ตำแหน่งใด



รูปที่ 89 ปัญหาการเคลื่อนที่ของอนุภาค (a) ออกจากเป้าหมายและ (b) กลับไปสู่เป้าหมาย

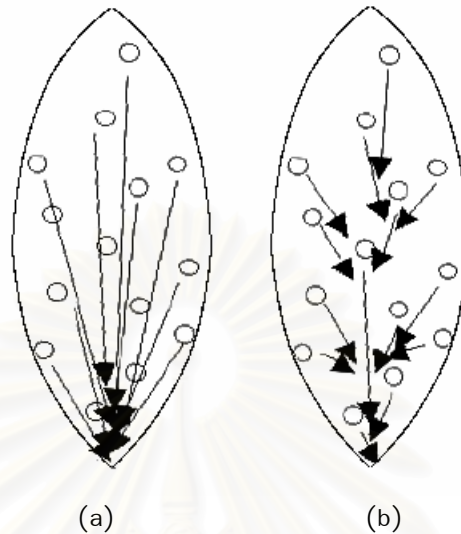
5.3 การขนส่งอนุภาค

การลำเลียงและการขนส่งเกิดขึ้นเมื่อแต่ละหน่วยเล็กๆ ของใบไม้ที่มีสารคลอโรฟิลล์ ได้รับแสงอาทิตย์ และเกิดการสังเคราะห์แสงขึ้น สารอาหารและพลังงานที่เกิดจากการสังเคราะห์นี้ ควรจะส่งต่อไปให้กับส่วนของลำต้นเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป ดังนั้นเพื่อจำลองหน้าที่การลำเลียงของเส้นใบนี้ ทำให้ขั้นตอนวิธีใหม่ได้ถูกพัฒนาขึ้น เรียกว่าขั้นตอนวิธีขนส่งอนุภาค

ขั้นตอนนี้เริ่มจากการแบ่งพื้นที่ใบไม้ที่กำหนดให้ออกเป็นส่วนย่อยๆ แต่ละส่วนมีขนาดเท่ากัน สมมติว่าได้รับแสงอาทิตย์เท่ากันและทั่วถึง แต่ละพื้นที่มีขนาดเท่ากัน มีสารคลอโรฟิลล์จำนวนเท่ากัน ทำให้ผลิตพลังงานได้ในปริมาณเท่ากัน และต้องการขนส่งพลังงานที่ผลิตได้ไปยังขั้วใบเพื่อส่งต่อไปให้กับก้านใบไปยังลำต้นของพืช สมมติตามกฎของการอนุรักษ์พลังงานกล่าวว่าพลังงานไม่มีการสูญหายอาจเปลี่ยนรูปได้ สมมติว่าในระหว่างการขนส่งพลังงานไม่มีการสูญหายหรือเปลี่ยนรูปไปจากเดิม วิธีการขนส่งที่ดีควรมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นเส้นทางการขนส่งจึงควรมีลักษณะเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

โดยทั่วไปแล้วเส้นใบไม้ทำหน้าที่ช่วยพยุงตัวใบเพื่อให้ใบได้รับแสง ทำหน้าที่เป็นท่อลำเลียงอาหารและน้ำ โครงสร้างของเส้นใบที่เหมาะสม ควรมีคุณลักษณะที่แข็งแรง แผ่กระจายทั่วถึงแผ่นใบทุกส่วน เส้นใบใช้เนื้อที่น้อยเพื่อให้ใบมีเนื้อที่ส่วนอื่นๆ สำหรับการสังเคราะห์แสง และทำหน้าที่เป็นท่อลำเลียงอย่างมีประสิทธิภาพ ในตอนเริ่มต้นขั้นตอนวิธีสำหรับโครงสร้างเส้นใบ สมมติให้ใบไม้มีรูปร่างที่แน่นอนแบบหนึ่งและยังไม่มีเส้นใบ ส่วนของใบไม้ทุกๆ ส่วนมีหน่วยสำหรับผลิตพลังงาน การผลิตพลังงานที่เกิดขึ้นมาในแต่ละหน่วยมีปริมาณเท่ากัน และมีความจำเป็นต้องขนส่งพลังงานไปยังก้านใบเพื่อส่งต่อไปยังส่วนของลำต้น โดยที่พลังงานไม่มีการสูญหายระหว่างการขนส่ง ดังนั้นเพื่อให้การลำเลียงพลังงานดังกล่าวเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โครงสร้างของเส้นใบควรมีเส้นทางที่เชื่อมต่อระหว่างหน่วยย่อยไปยังก้านใบเป็นแนวเส้นตรง (รูปที่ 90a) ทำให้ได้ลักษณะของเส้นใบคล้ายพืชใบเลี้ยงเดี่ยว มีเส้นใบขนาน และเส้นใบมีขนาดเล็กเท่ากัน เนื่องจากขนส่งพลังงานเท่ากันจากหน่วยผลิตแต่ละหน่วย แต่โครงสร้างที่เกิดขึ้นมา ยังไม่มีประสิทธิภาพมากนักเนื่องจากการต่อเชื่อมแบบตรงของเส้นใบ เป็นการสิ้นเปลืองที่ต้องใช้เส้นทางจำนวนมาก ในแบบจำลองที่ปรับปรุงต่อมา (รูปที่ 90b) ยอมให้มีการใช้เส้นทางร่วมกัน โครงสร้างเส้นใบที่ได้มีโครงสร้างคล้ายเส้นใบในพืชใบเลี้ยงคู่ มีเส้นใบเป็นโครงข่าย มีความกว้างของเส้นใบไม่เท่ากัน บริเวณรอบนอกเส้นใบจะมีขนาดเล็ก และบริเวณก้านใบเส้นใบมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากปริมาณพลังงานที่ต้องขนส่งเพิ่มขึ้น สำหรับขั้นตอนวิธีนี้มีพารามิเตอร์ที่ไม่ซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้ L-systems อีกทั้งโครงสร้างที่ได้มีความคล้ายกับใบไม้จริงและครอบคลุมใบไม้ได้หลายชนิด ขั้นตอนวิธีนี้สามารถสร้างโครงสร้างเส้นใบจากรูปร่างที่กำหนดให้ การกำหนดรูปร่างภายนอกของโครงสร้างทำได้ 2 วิธี คือ นำภาพจากใบไม้จริงมาผ่านกระบวนการหาเส้นขอบนอกของใบ หรือสร้างเส้นขอบใบจากเส้นโค้ง spline ตามต้องการ ด้วยลักษณะเดียวกันนี้ จึงมีความเป็นไปได้ในการปรับปรุงเพื่อนำ

ขั้นตอนวิธีนี้ไปใช้สร้างโครงสร้างของต้นไม้ตามรูปร่างที่ต้องการได้ เนื่องจากโครงสร้างของต้นไม้ทำหน้าที่ลำเลียงอาหารและน้ำ เช่นเดียวกับโครงสร้างของใบซึ่งจะกล่าวถึงในบทถัดไป



รูปที่ 90 แบบจำลองใบไม้สำหรับการขนส่งพลังงาน

5.3.1 แนวความคิดของขั้นตอนวิธีขนส่งอนุภาค แบบที่ 1

ขั้นตอนวิธีขนส่งอนุภาคเริ่มจากการแบ่งพื้นที่ออกเป็นส่วนย่อยๆ แต่แต่ละส่วนมีขนาดเท่ากัน พื้นที่แต่ละส่วนแทนด้วยอนุภาคแต่ละตัว ในอนุภาคแต่ละตัวมีพลังงานเริ่มต้น 1 หน่วย จุดหมายของการขนส่งคือบริเวณโคนใบ อนุภาคแต่ละตัวเคลื่อนที่ได้ระยะทางเท่ากันใน 1 หน่วยเวลา อนุภาคที่ละตัวเคลื่อนที่ไปได้อย่างอิสระไม่เกี่ยวข้องกัน แต่แต่ละตัวมีทิศทางของตัวเอง และอนุภาคไม่มีการชนกัน ขั้นตอนวิธีนี้จะสิ้นสุดเมื่ออนุภาคทุกตัวเคลื่อนที่ถึงยังเป้าหมาย กำหนดให้ผลลัพธ์ที่ได้คือเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคทุกๆ ตัว แทนลักษณะการวางรูปแบบของท่อลำเลียง หรือโครงสร้างของเส้นใบไม้

วิธีที่ 1

1. วางอนุภาคภายในพื้นที่รูปใบไม้ที่ได้กำหนดไว้
2. ให้อนุภาคแต่ละตัวเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายที่โคนใบ
3. ทำซ้ำข้อ 2 จนกว่า อนุภาคทั้งหมดเคลื่อนที่ไปถึงเป้าหมาย

5.3.2 แนวความคิดของขั้นตอนวิธีขนส่งอนุภาค แบบที่ 2

จากขั้นตอนวิธีขนส่งอนุภาคแบบแรกนั้น มีประสิทธิภาพในการล่ำเลียงได้ดีเนื่องจากเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดจากจุดเริ่มต้นไปยังเป้าหมาย แต่เมื่อพิจารณาจากการที่จำเป็นต้องมีเส้นทางล่ำเลียงเฉพาะสำหรับทุกจุดแล้ว เป็นการล่ำเลียงเปลืองในการสร้างเส้นทางล่ำเลียง และเป็นการลดพื้นที่ใช้งานอื่นๆ ด้วย ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว วิธีขนส่งพลังงานแบบที่ 2 ได้ปรับปรุงให้มีวัตถุประสงค์ 2 อย่างคือ 1) เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมาย และ 2) การใช้เส้นทางร่วมกัน สำหรับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้จากการแบ่งครึ่งมุมระหว่างเวกเตอร์ที่ชี้ไปยังอนุภาคที่ใกล้ที่สุดและเป้าหมาย เมื่ออนุภาคแต่ละตัวเคลื่อนที่ก็จะเข้าใกล้เป้าหมายและเข้าใกล้อนุภาคตัวที่ใกล้เคียงที่สุดด้วย เมื่ออนุภาคเข้าใกล้กันในระยะหนึ่งก็จะรวมอนุภาคเข้าด้วยกัน เพื่อให้เป็นอนุภาคใหม่ที่ได้ใช้เส้นทางเดียวกัน

วิธีที่ 2

1. วางอนุภาคภายในพื้นที่รูปใบไม้ที่กำหนดไว้
2. ให้อนุภาคแต่ละตัวเคลื่อนที่โดยมีทิศทางที่เข้าร่วมกันจากทิศทางทั้งสองคือ
 - 2.1 ทิศทางที่ไปยังเป้าหมายที่โคนใบ
 - 2.2 ทิศทางที่ไปยังอนุภาคตัวที่ใกล้ที่สุด
3. เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าใกล้กันในระยะที่กำหนดให้รวมอนุภาคเข้าด้วยกัน
4. ทำซ้ำข้อ 2 และ 3 จนกว่า อนุภาคทั้งหมดเคลื่อนที่ไปถึงเป้าหมาย

รูปแบบของเส้นใบไม้ในธรรมชาตินั้นมีรูปแบบคล้ายกับลักษณะของการเคลื่อนที่ในลักษณะเป็นเส้นตรง (รูปที่ 90-a) เกิดขึ้นกับใบไม้ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว และลักษณะที่เป็นเส้นโค้งตาข่าย (รูปที่ 90-b) เกิดขึ้นกับใบไม้ของพืชใบเลี้ยงคู่สำหรับทิศทางการเคลื่อนที่ในแบบที่สองนั้นเป็นการแบ่งครึ่งมุมระหว่างเวกเตอร์ที่ชี้ไปยังเป้าหมายและเวกเตอร์ที่ชี้ไปยังตัวที่ใกล้ที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3.3 ขั้นตอนวิธีขนส่งอนุภาค

ALGORITHM PARTICLE TRANSPORTAION

Given an outline boundary:

S is a set of particles. **P** \in **S** contains: pos (position: a point (x,y)), en (energy), rd (radius). **T** is the target point (at the bottom of a leaf). **W_p**, **W_q** are weight factors

1. Place **S** inside the boundary
2. **For each P do**
3. **N** is the nearest particle to **P**
4. **if P.pos - N.pos < P.rd + N.rd then**
// combine two particles
5. **P.pos** \leftarrow (**P.pos** + **N.pos**)/2
6. **P.en** \leftarrow **P.en** + **N.en**
7. **S** \leftarrow **S** - {**N**}
- // check P reaches the target*
8. **if** |**T** - **P.pos**| < **P.rd** **then** *// delete P*
9. **S** \leftarrow **S** - {**P**}
10. **else** *// move P*
11. **V₁** \leftarrow normalise(**T** - **P.pos**)
12. **V₂** \leftarrow normalise(**N.pos** - **P.pos**)
13. **V₃** \leftarrow normalise(**W_p** \times **V₁** + **W_q** \times **V₂**)/(**W_p** + **W_q**)
14. **P.pos** \leftarrow **P.pos** + **V₃** \times stepsize
15. **repeat** 2-14 **until** **S** = ϕ

5.3.4 การคำนวณในขั้นตอนวิธีขนส่งพลังงาน

คุณสมบัติของอนุภาคแต่ละตัวจัดอยู่ในรูปของกลุ่มดังนี้

$$K = (P, \bar{D}, R, E) \quad (5.1)$$

เมื่อ

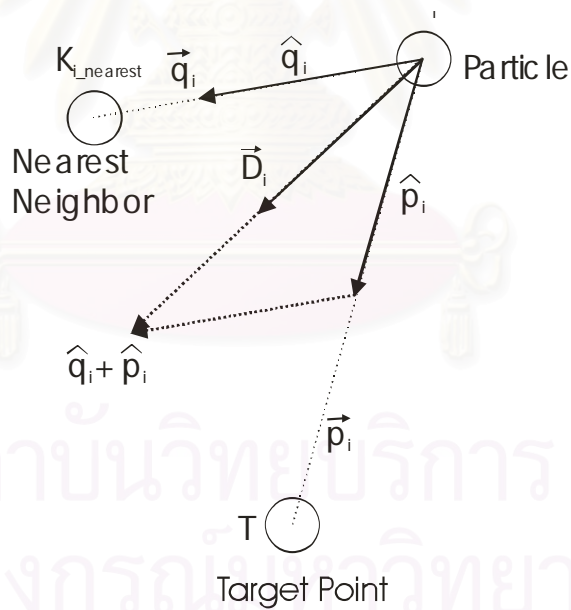
K_i แทนอนุภาคตัวที่ i

P_i แทนตำแหน่งปัจจุบันของอนุภาค K_i

\bar{D}_i แทนเวกเตอร์ทิศทางของอนุภาค K_i

R_i แทนขนาดรัศมีของอนุภาค K_i

E_i แทนพลังงานที่อนุภาค K_i มีอยู่



รูปที่ 91 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค

5.3.4.1 ทิศทางการเคลื่อนที่

เวกเตอร์ทิศทาง \bar{D}_i ของอนุภาค K_i คำนวณได้จากสมการ

$$\bar{D}_i = \frac{\hat{p}_i + \hat{q}_i}{\|\hat{p}_i + \hat{q}_i\|} \quad (5.2)$$

เมื่อเครื่องหมาย $\|\bar{x}\|$ เป็นขนาดสเกลลาร์ของเวกเตอร์ \bar{x}
 \bar{p}_i เป็นเวกเตอร์ที่ชี้ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย และ \bar{q}_i เป็นเวกเตอร์ที่ชี้ไปยังอนุภาคตัวที่ใกล้ที่สุด
 ของอนุภาค K_i คำนวณได้จากสมการ

$$\bar{p}_i = (X_T - X_{P_i}, Y_T - Y_{P_i}) \quad (5.3)$$

และ

$$\bar{q}_i = (X_{P_{i_nearest}} - X_{P_i}, Y_{P_{i_nearest}} - Y_{P_i}) \quad (5.4)$$

เมื่อตำแหน่งปัจจุบันของอนุภาค K_i แทนด้วย $P_i = (X_{P_i}, Y_{P_i})$ ตำแหน่งเป้าหมาย $T = (X_T, Y_T)$
 และตำแหน่งอนุภาคตัวที่ใกล้ที่สุดของอนุภาค K_i แทนด้วย $P_{i_nearest} = (X_{P_{i_nearest}}, Y_{P_{i_nearest}})$

\hat{p}_i เป็นเวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยมีทิศทางเดียวกับ \bar{p}_i ที่ชี้ไปยังเป้าหมาย ได้จากสมการ

$$\hat{p}_i = \frac{\bar{p}_i}{\|\bar{p}_i\|} \quad (5.5)$$

\hat{q}_i เป็นเวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยมีทิศทางเดียวกับ \bar{q}_i ที่ชี้ไปยังอนุภาคตัวที่ใกล้ที่สุด ได้จาก
 สมการ

$$\hat{q}_i = \frac{\bar{q}_i}{\|\bar{q}_i\|} \quad (5.6)$$

การปรับปรุงสมการเพื่อให้รองรับลักษณะของการเคลื่อนที่ทั้งสองแบบทำได้โดยเพิ่มตัวแปร
 ขึ้นมาสำหรับปรับความสำคัญระหว่างเป้าหมายกับตัวที่ใกล้ที่สุด ดังนี้

$$\bar{D}_i = \frac{w_p \hat{p}_i + w_q \hat{q}_i}{\|w_p \hat{p}_i + w_q \hat{q}_i\|} \quad (5.7)$$

เมื่อ $w_p \in [0,1]$; $w_q \in [0,1]$ และ $w_p + w_q = 1.0$

- สำหรับการเคลื่อนที่แบบที่ 1 คือเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายอย่างเดียว กำหนดให้ $w_p = 1.0$ และ $w_q = 0.0$
- สำหรับการเคลื่อนที่แบบที่ 2 คือเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมาย และเคลื่อนที่ไปยังตัวที่ใกล้ที่สุดด้วย กำหนดให้ทั้งสองมีขนาดเท่ากันคือ $w_p = 0.5$ และ $w_q = 0.5$

กรณีที่หาอนุภาคตัวที่ใกล้อนุภาค K_i ที่สุดไม่ได้ เช่นเหลืออนุภาคเพียง 1 ตัว กำหนดให้

$$\bar{D}_i = \hat{p}_i \quad (5.8)$$

5.3.4.2 การเคลื่อนที่

การคำนวณหาตำแหน่งของอนุภาค ดังนี้

$$P_i(t+1) = P_i(t) + \vec{v}_i(t) \quad (5.9)$$

เมื่อ $P_i(t+1)$ เป็นตำแหน่งของอนุภาค K_i เมื่อเวลาที่ $t+1$
 $P_i(t)$ เป็นตำแหน่งของอนุภาค K_i เมื่อเวลาที่ t
 $\vec{v}_i(t)$ เป็นความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อเวลาที่ t
 และ $P_i(t=0)$ เป็นตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาค K_i

หาค่า v ได้จาก

$$\vec{v}_i(t) = s \cdot \bar{D}_i(t) \quad (5.10)$$

เมื่อ $\bar{D}_i(t)$ เป็นเวกเตอร์บอกทิศทางของอนุภาค K_i เมื่อเวลาที่ t
 s เป็นระยะทางของการเคลื่อนที่ของอนุภาคใน 1 หน่วยเวลา

5.3.4.3 การรวมอนุภาค

เมื่ออนุภาคเข้าใกล้กันจะเกิดการรวมอนุภาคเข้าด้วยกันเป็นอนุภาคตัวใหม่ ตามสมการ

$$K_{i_new} = K_i + K_{i_nearest} \quad (5.11)$$

จะเกิดขึ้นตามเงื่อนไขเมื่อ

$$\|\vec{q}_i\| \leq R_i + R_{i_nearest} \quad (5.12)$$

เมื่อ $R_{i_nearest}$ เป็นรัศมีของอนุภาคตัวที่ใกล้ที่สุด

ในการรวมกันคำนวณคุณสมบัติต่างๆ ของอนุภาคที่เกิดขึ้นใหม่ดังนี้

ตำแหน่งใหม่

$$P_{i_new} = \frac{P_i \cdot R_i + P_{i_nearest} \cdot R_{i_nearest}}{R_i + R_{i_nearest}} \quad (5.13)$$

พลังงานรวม

$$E_{i_new} = E_i + E_{i_nearest} \quad (5.14)$$

และรัศมี

$$R_{i_new} = \frac{R_i + R_{i_nearest}}{2} \quad (5.15)$$

เมื่อ $P_{i_new}, E_{i_new}, R_{i_new}$ เป็นคุณสมบัติของอนุภาคใหม่ K_{i_new} ส่วนอนุภาคเดิม $K_i, K_{i_nearest}$ จะสลายหายไป

5.4 รูปร่างของขอบใบ

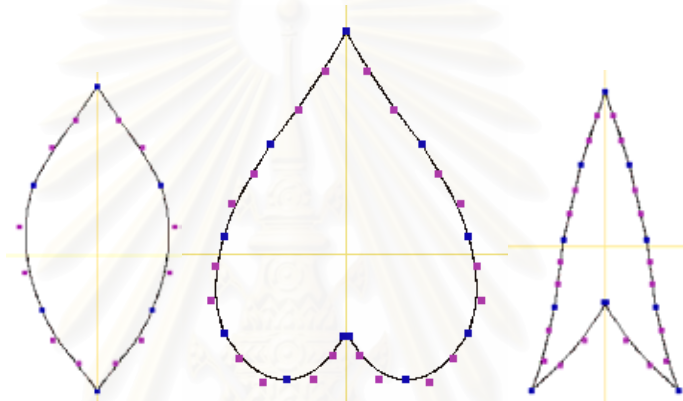
การสร้างรูปร่างภายนอกของขอบใบทำได้ 2 วิธีคือ

5.4.1 จากภาพใบไม้จริง

เป็นการตรวจกวาด(scan) จากภาพใบไม้จริง และลบภาพส่วนที่ไม่ใช่ใบไม้ออกไป เช่นก้านใบ หรือหูใบ และจึงหาเส้นขอบใบจากภาพ

5.4.2 จากการสังเคราะห์

เป็นการสังเคราะห์เส้นขอบใบจากสมการคณิตศาสตร์สร้างจาก spline curve ในกรณีของ spline curve นั้น สามารถสร้างได้อย่างสะดวก จากการเลื่อนจุดควบคุมไปยังตำแหน่งที่ต้องการ เป็นรูปร่างใบไม้ต่างๆ ได้ รูปร่างใบอาจมีความสมมาตรหรือไม่สมมาตรได้ จากการทดสอบพบว่าโดยเฉลี่ยใช้ spline curve ประมาณข้างละ 5 อันสามารถสร้างเป็นรูปร่างใบไม้ได้ทุกรูปแบบตามต้องการ (รูปที่ 92) ใบไม้ที่ได้จากการเชื่อมต่อกันของ spline curve หลายๆ เส้นยังสามารถประยุกต์ให้สร้างเส้นหยักรูปแบบต่างๆ ได้จากเส้นตั้งฉากที่สัมผัสกับเส้น spline curve ได้



รูปที่ 92 รูปร่างใบไม้จาก Spline Curve (จุดในภาพคือ Control Points)

การสร้างเส้นขอบใบไม้ด้วยเส้นโค้ง spline สร้างรอยหยักของเส้นขอบใบ (รูปที่ 94) ซึ่งรอยหยักจะโค้งไปตามความชันของเส้นขอบใบ ควบคุมด้วยพารามิเตอร์ขอบใบ 4 ตัวคือ

- **จำนวนของรอยหยัก** (loop) เป็นจำนวนการวนซ้ำของรอยหยักต่อเส้น Spline 1 เส้น ค่าจำนวนมากทำให้มีรอยหยักมาก
- **ความสูง** (height) มีค่ามากทำให้เห็นรอยหยักได้เด่นชัด
- **จำนวนความละเอียดของรอยหยัก** (internal loop) จำนวนการวนซ้ำของเส้นแสดงขอบ ค่าจำนวนมากทำให้รอยหยักมีความโค้งมาก ถ้ามีค่าน้อยรอยหยักจะมีลักษณะของฟันเลื่อย
- **ลักษณะของรอยหยัก** มี 4 แบบ คือ
 - เส้นขอบตรง (Linear)
 - เส้นขอบโค้งเข้า (Concave Curve)
 - เส้นขอบโค้งออก (Convex Curve)
 - ฟันเลื่อยสามเหลี่ยม

ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 94-a แสดงลักษณะของเส้น Spline ปกติ ในรูปที่ 94-b กำหนดให้ $loop=1$ แสดงจำนวนรอยหยัก 1 อัน ในรูปที่ 94-c กำหนดให้ $loop=4$ แสดงจำนวนรอยหยัก 4 อัน เป็นต้น ในรูปที่ 95 แสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ขอบใบแบบต่างๆ ที่มีกับเส้นโค้ง Spline และในรูปที่ 96 แสดงตัวอย่างของภาพใบไม้ที่มีการปรับพารามิเตอร์ขอบใบแบบต่างๆ กัน คือ แบบเส้นตรงปกติ (รูปที่ 96-a) แบบโค้งเข้า มีจำนวนรอยหยักน้อยความละเอียดของรอยหยักมาก (รูปที่ 96-b) ฟันเลื่อยสามเหลี่ยม มีจำนวนรอยหยักน้อยความละเอียดของรอยหยักมาก (รูปที่ 96-c) แบบโค้งเข้า มีจำนวนรอยหยักมากความละเอียดของรอยหยักน้อย (รูปที่ 96-d) ด้วยวิธีนี้สามารถกำหนดเพิ่มเติมให้ขอบใบมีรอยหยักได้หลายรูปแบบได้ตามความต้องการ

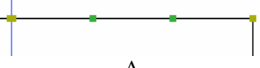

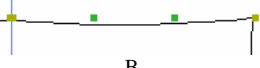

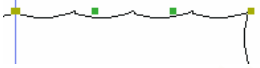
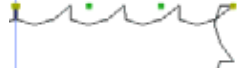
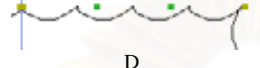
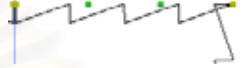


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



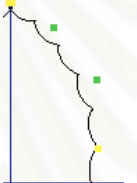
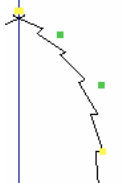
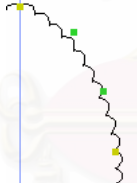

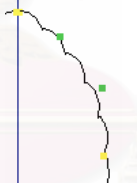
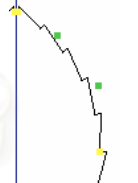
acicular	cordate (Heart-Shaped)	cuneate	deltoid	eliptic	ensiform (Sword-Shaped)	falcate
filiform	lanceolate (Lanced-Shaped)	ligulate, lingulate (Tongue-Shaped)	linear	lorate	orbicular (Round-Shaped)	oblanceolate (Inversely Lanced-Shaped)
oblong	obovate (Inversely Egg-Shaped)	obcordate (Inversely Heart-Shaped)	oval	ovate (Egg-Shaped)	palmatiobate (Palm-Shaped)	reniform (Kidney-Shaped)
rhomboidal (Rhombus-Shaped)	sagittate (Arrow-Shaped)	spathulate (Spoon-Shaped)	subulate			

รูปที่ 93 รูปร่างของใบไม้แบบต่าง ๆ สร้างด้วย Spline Curve

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

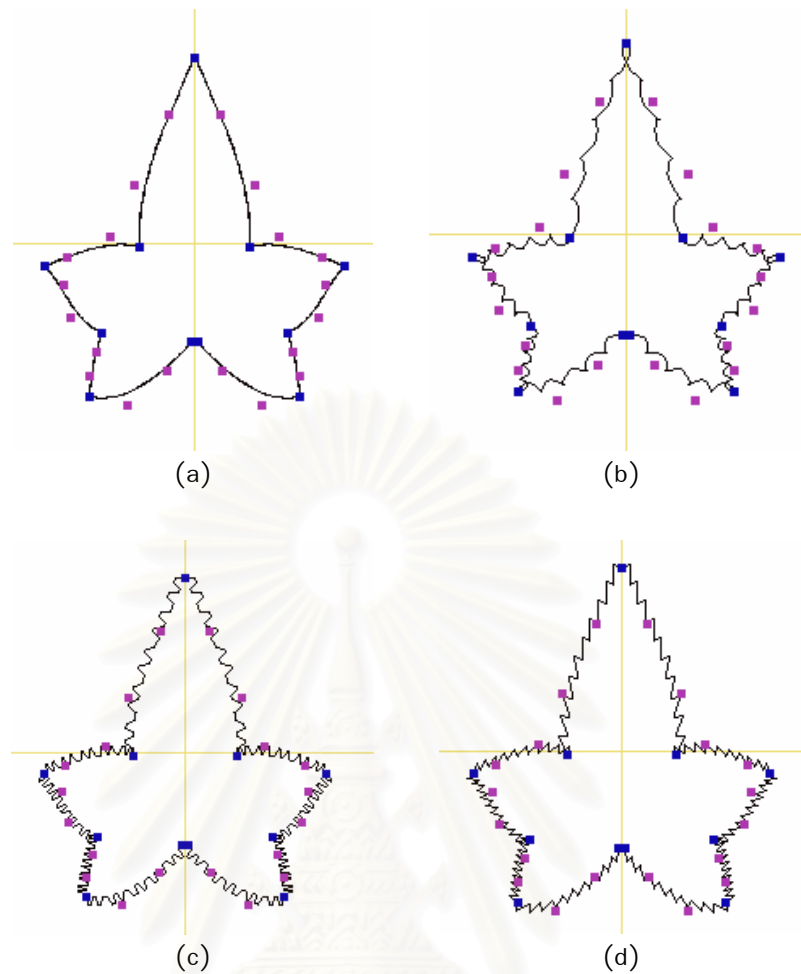
 <p>A Linear, Loop=4 int=10 Height=5</p>	 <p>E Concave, Loop=4 int=20 Height=15</p>
 <p>B Concave, Loop=1 int=10 Height=5</p>	 <p>F Concave, Loop=4 int=10 Height=15</p>
 <p>C Concave, Loop=4 int=10 Height=5</p>	 <p>G Concave, Loop=4 int=4 Height=15</p>
 <p>D Concave, Loop=4 int=10 Height=10</p>	 <p>H Concave, Loop=4 int=2 Height=15</p>

รูปที่ 94 การปรับพารามิเตอร์ของเส้นขอบบนเส้นตรง

			
<p>Concave Curve Loop=10 Thickness = 5 Internal = 10</p>	<p>Concave Curve Loop=10 Thickness = 20 Internal = 10</p>	<p>Concave Curve Loop=5 Thickness = 5 Internal = 10</p>	<p>Concave Curve Loop=5 Thickness = 5 Internal = 2</p>
			
<p>Convex Curve Loop=10 Thickness = 5 Internal = 10</p>	<p>Convex Curve Loop=5 Thickness = 20 Internal = 10</p>	<p>Convex Curve Loop=5 Thickness = 5 Internal = 10</p>	<p>Convex Curve Loop=5 Thickness = 5 Internal = 2</p>

รูปที่ 95 การปรับพารามิเตอร์ของเส้นขอบบน Spline Curve

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 96 ภาพใบไม้และเส้นขอบแบบต่าง ๆ แบบเส้นตรงปกติ (a) แบบโค้งเข้า (b) ฟันเลื่อยสามเหลี่ยม (c) แบบโค้งเข้า (d)

5.5 การจัดวางอนุภาค

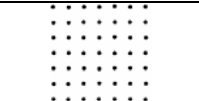
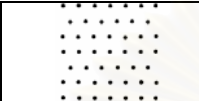


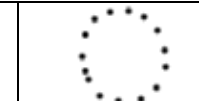
5.5.1 รูปแบบการจัดเรียงอนุภาคภายในพื้นที่ที่กำหนด

การจัดเรียงตำแหน่งอนุภาคแบ่งเป็น 5 วิธี (รูปที่ 97) คือ

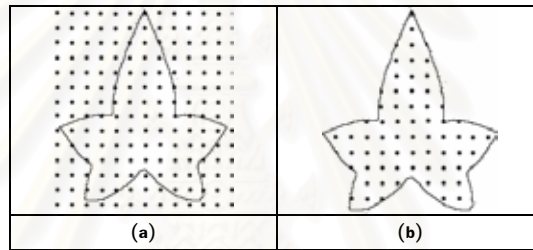
- จัดเรียงแบบตารางสี่เหลี่ยม (square distribution) มีรูปแบบการจัดวางแน่นอน มีระยะห่างระหว่างอนุภาคของด้านบนและด้านข้างเท่าๆ กัน
- จัดเรียงแบบตารางหกเหลี่ยม (hexagonal distribution) มีรูปแบบการจัดวางแน่นอน ปรับปรุงจากแบบ square มีระยะห่างระหว่างด้านบนและด้านล่างเท่าๆ กัน ทุกๆ 3 แถวจะเลื่อน 1 แถวไปตามแนวราบครึ่งหน่วย
- จัดเรียงแบบสุ่ม (jitter distribution) มีรูปแบบสุ่ม นำอนุภาคที่จัดเรียงแบบ square มาเลื่อนตำแหน่งด้วยค่าสุ่ม ไม่เกินความกว้างของระยะห่างระหว่างอนุภาคด้านบนและด้านข้าง

- จัดเรียงแบบสม่ำเสมอ (uniform distribution) มีรูปแบบสม่ำเสมอ วางอนุภาคต่างๆ ตามตำแหน่งที่สม่ำเสมอได้
- จัดเรียงบริเวณเส้นขอบ (edge distribution) จัดวางอนุภาคบริเวณเส้นขอบมีระยะห่างตามระยะของเส้น Spline

การจัดวางอนุภาคจะตรวจสอบว่าอนุภาคใดอยู่ภายในขอบใบบ้าง อนุภาคที่อยู่นอกขอบใบจะถูกเอาออก ตามรูปที่ 98-B

				
<i>Square</i>	<i>Hex</i>	<i>Jitter</i>	<i>Random</i>	<i>Boundary Edge</i>

รูปที่ 97 ลักษณะการจัดวางจุดแบบต่างๆ



รูปที่ 98 การจัดวางจุดแบบตารางสี่เหลี่ยม (a) จุดที่ภายในเส้นขอบใบ (b)

5.5.2 ความหนาแน่นของอนุภาค

การจัดเรียงอนุภาคจะกำหนดระยะห่างโดยผู้ใช้เพื่อควบคุมปริมาณของจุดต่อพื้นที่ ในกรณีของการจัดวางอนุภาคแบบสม่ำเสมอจะไม่สามารถกำหนดระยะห่างได้ จะใช้วิธีกำหนดจากจำนวนอนุภาคที่วางแทน

5.6 การสร้างเส้นใบไม้ด้วยระบบขนส่งอนุภาค

เริ่มจากการจัดวางอนุภาคตามตำแหน่ง ในภาพจัดวางด้วยการจัดเรียงแบบตารางสี่เหลี่ยม อนุภาคเคลื่อนที่ตามกฎที่กำหนดคือเคลื่อนที่ไปยังอนุภาคที่ใกล้ที่สุดและเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายที่อยู่ตรงกลางของโคนใบ เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ เส้นทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านไปกำหนดให้ใช้เป็นเส้นใบ การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในรูปร่างของใบไม้ (รูปที่ 100) ความเข้มข้นของสีจะขึ้นอยู่กับว่าอนุภาคนั้นมีพลังงานมากเท่าใด เมื่อมีพลังงานน้อยจะวาดเส้นด้วยสีอ่อน เมื่ออนุภาคเกิดการรวมตัวกันจะมีพลังงานเพิ่มขึ้นทำให้วาดสีเข้มขึ้น อนุภาคจากส่วนขอบใบจะมีการรวมตัวกันน้อยทำให้มีสีอ่อน เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าหา เป้าหมายส่วนบริเวณโคน

ใบ อนุภาคมีการรวมตัวกันมากขึ้นทำให้ได้เส้นสีเข้ม เพื่อให้ภาพเส้นใบที่สร้างขึ้นมีสีปรากฏในบริเวณที่เส้นใบเห็นได้ไม่ชัด จึงวาดสีของรัศมีรอบๆ เส้นด้วย สีและรัศมีขึ้นอยู่กับค่าพลังงานเช่นกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนวิธีจะเป็นภาพลายเส้นที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคในทิศทางต่างๆ รวมกันที่โคนใบ



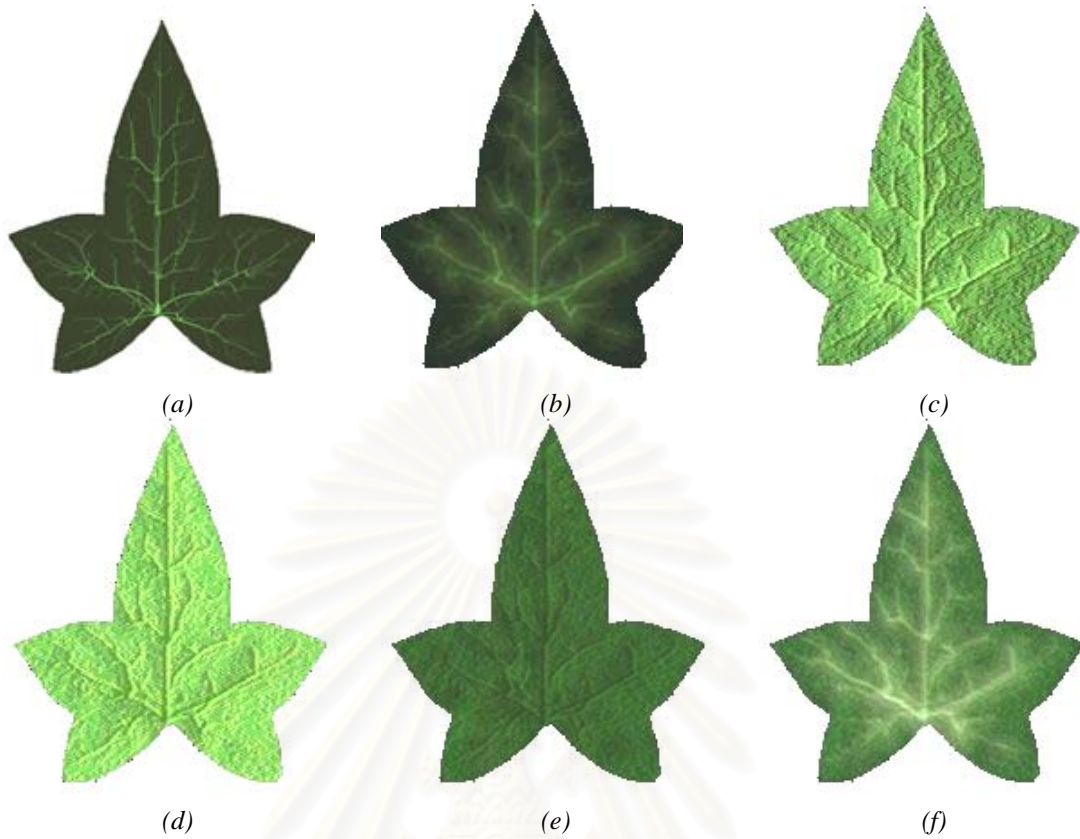
รูปที่ 99 การสร้างเส้นใบด้วยระบบขนส่งอนุภาค



รูปที่ 100 การสร้างเส้นใบด้วยระบบขนส่งอนุภาค

5.7 การปรับปรุงผลลัพธ์

ผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริทึมจะได้เส้นใบที่มีความเข้มของสีต่างๆ เพื่อความสมจริงยิ่งขึ้น จากผลลัพธ์เดิม (รูปที่ 101-a) การปรับปรุงทำโดยเพิ่ม ความหนาของเส้น โดยให้สีจางๆ บริเวณรอบๆ ตามสีเส้น จากนั้นเพิ่มสีส้ม (noise) ลงไปเพื่อให้ใบไม้ดูขรุขระขึ้น ไม่เรียบจนเกินไป จากนั้นนำมาลดความคมชัด (blur) โดยใช้ gaussian blur ขนาด 3x3 เพื่อให้ noise ที่ใส่ลงไปดูนุ่มนวล (smooth) ขึ้น (รูปที่ 101-b) เพื่อให้ภาพดูหนา (embossed) แต่ละจุดภาพจะใช้ ความสว่าง (intensity) เป็นตัวแสดงค่าความสูงภาพ และคำนวณความเข้มของแสงสะท้อนที่ตกกระทบในแนวเฉียงและใส่สีใหม่ นำกลับมาสร้างเป็นภาพใหม่ (รูปที่ 101-c) ภาพที่ได้จะดูเสมือนกับด้านหลังของภาพใบไม้ จะเห็นส่วนก้านที่นูนออกมา ดังนั้นจึงทำการ invert ภาพ เพื่อให้เห็นว่าเป็นด้านใบด้านหน้า จะเห็นว่าส่วนของก้านมีรอยยุบลงไป (รูปที่ 101-d) ภาพที่สร้างใหม่ จะมีสีไม่เหมือนกับของจริง ดังนั้นจึงนำสีจากใบไม้จริงมาใช้ (รูปที่ 101-e) ใบไม้บางประเภทส่วนของก้านใบจะมีสีแตกต่างจากส่วนเนื้อใบ ทำได้โดยนำภาพ (รูปที่ 101-b) เปลี่ยนให้เป็นสีขาว และเอามาใช้ผสมกับภาพ (รูปที่ 101-e) ได้ภาพ (รูปที่ 101-f)







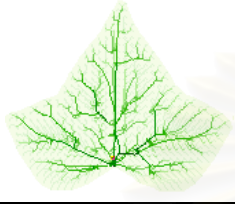


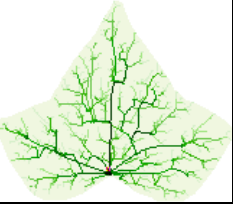
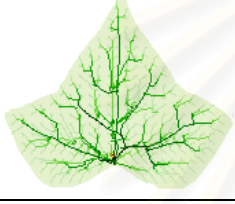
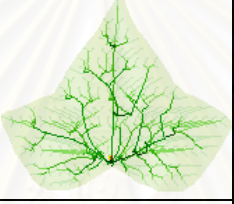
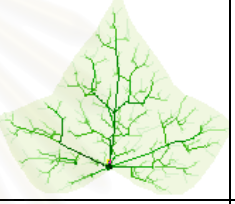
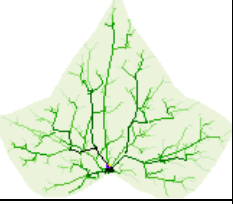
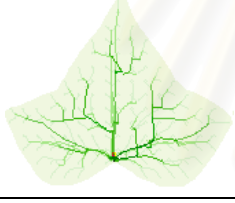
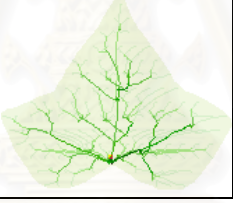
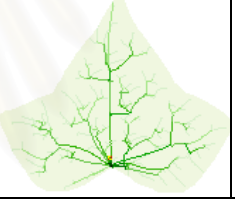
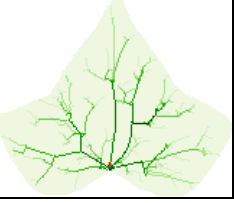
รูปที่ 101 การปรับปรุงภาพเส้นใบ

5.8 พารามิเตอร์

ตาราง 5 , ตาราง 6 และ ตาราง 7 แสดงผลลัพธ์จากขั้นตอนวิธี ใช้รูปร่างใบไม้จริง IVY, ใบไม้สังเคราะห์รูปร่าง PALM และ SAGITTATE ตามลำดับ เปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ต่างๆ จากซ้ายไปขวาใช้พารามิเตอร์การจัดเรียงแบบต่างๆ กัน จากการเรียงอนุภาคแบบเป็นระเบียบสู่การเรียงอนุภาคแบบสุ่ม จากบนลงล่างแสดงการจัดเรียงด้วยระยะห่างต่างกันคือ 3, 5, 7, 10 pixels ตามลำดับ จากระยะห่างสามารถคำนวณเป็นความหนาแน่นของจำนวนอนุภาคต่อพื้นที่ 10 หน่วย (10 pixels) ได้เท่ากับ 33, 20, 14, 10 particles/(10pixels)² ตามลำดับ



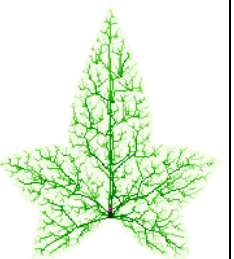
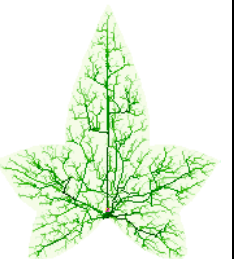









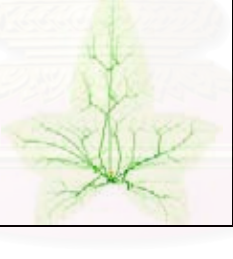

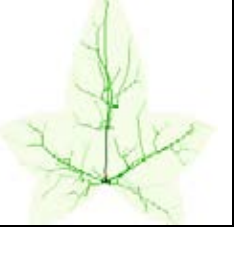
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 5 ใบ IVY และผลของพารามิเตอร์การจัดเรียงแบบต่าง ๆ

particles/(10 pixels) ²	square	hex	jitter	random
33				
20				
14				
10				




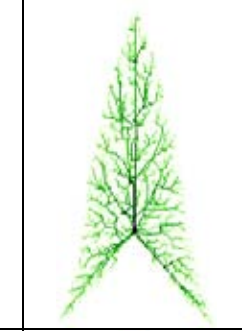



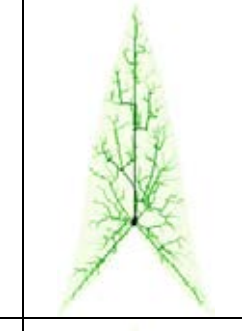



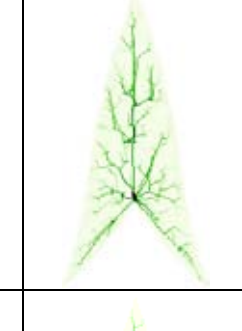


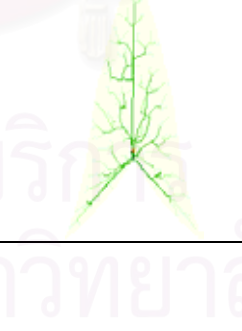
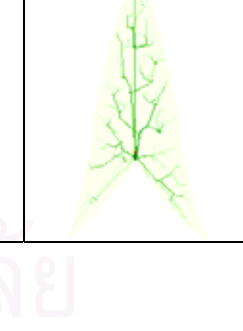
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 6 ใบ PALM และผลของพารามิเตอร์การจัดเรียงแบบต่าง ๆ

particles/(10 pixels) ²	square	hex	jitter	random
33				
20				
14				
10				

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 7 ใบ SAGITTATE และผลของพารามิเตอร์การจัดเรียงแบบต่างๆ

particles/(10 pixels) ²	square	hex	jitter	random
33				
20				
14				
10				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.8.1 ลักษณะของเส้นใบที่ได้จากพารามิเตอร์ต่างๆ

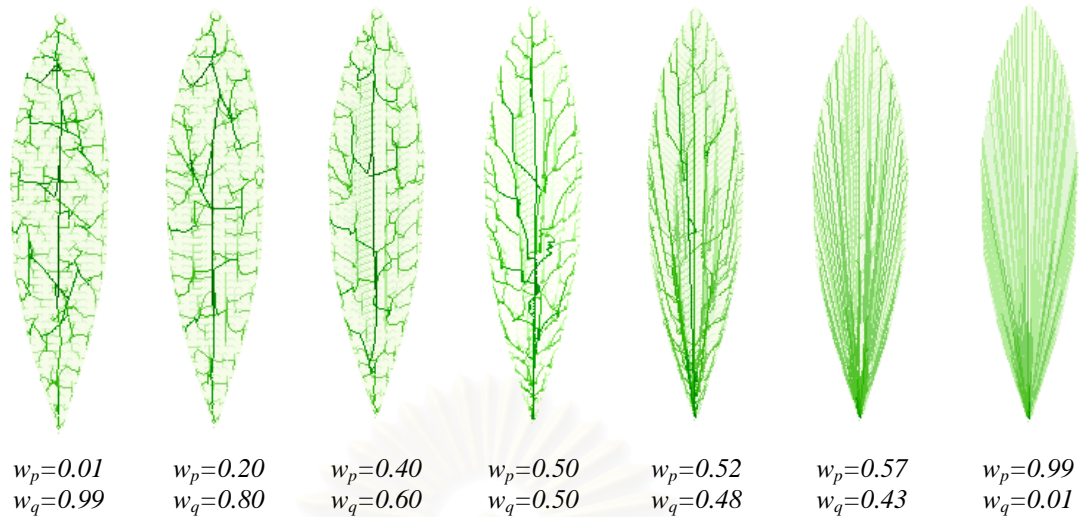
เส้นใบที่ได้จาก jitter และ random มีการกระจายของเส้นทั่วบริเวณ แต่ตัวเส้นมีลักษณะยุ่งเหยิง และคดเคี้ยว การเชื่อมของเส้นไม่เป็นระเบียบไม่มีสมดุลง เมื่อเปรียบเทียบกับแบบ square เส้นที่ได้จาก square มีลักษณะค่อนข้างตรงและเป็นระเบียบ เมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ เมื่อใช้จำนวนอนุภาคมากๆ ระยะห่างระหว่างอนุภาคน้อย ในแบบ square พบว่าเส้นจะแผ่ไปด้านใดด้านหนึ่งทำให้อีกด้านหนึ่งว่าง ในแบบ hex เส้นจะวิ่งในแนวนอนเป็นส่วนใหญ่ ก่อนจะรวมเป็นเส้นหลัก ในแบบ jitter กระจายทั่วถึงพื้นที่มากกว่าแบบอื่นๆ และดูเป็นระเบียบแบบแผนมากกว่าแบบ random ซึ่งมีการกระจายของเส้นเหมือนกัน จากการเปรียบเทียบเส้นใบกับใบไม้จริง ต้นแบบ พบว่าผลลัพธ์ที่ใช้แบบ square และแบบ jitter ที่ใช้ความหนาแน่น 14 particles/(10pixels)² มีความคล้ายกับต้นแบบมากกว่าแบบอื่นๆ เป็นที่น่าสังเกตว่านอกจากขั้นตอนวิธีจะสร้างเส้นใบหลัก 3 เส้นแล้ว ในส่วนล่างของใบยังมีเส้นใบอีก 2 เส้น และเส้นรองคล้ายกับใบไม้จริงอีกด้วย อย่างไรก็ตามจากการทดลองกับใบไม้หลายๆ แบบพบว่า แบบ square มีความเหมาะสมมากกว่าแบบอื่นๆ โดยใช้ความหนาแน่นของอนุภาคส่วนใหญ่ อยู่ในช่วง 14 ถึง 20 particles/(10pixels)²

5.8.2 ความสำคัญระหว่างเป้าหมายกับตัวที่ใกล้ที่สุด

มีเวกเตอร์ควบคุมสองตัวสำหรับการเคลื่อนที่ คือ w_p เป็นอัตราส่วนของเวกเตอร์ที่ชี้ไปยังเป้าหมาย และ w_q เป็นอัตราส่วนของเวกเตอร์ที่ชี้ตัวที่ใกล้ที่สุดเมื่อ $w_p + w_q = 1.0$ ตามสมการ

$$\vec{D}_i = \frac{w_p \hat{p}_i + w_q \hat{q}_i}{\|w_p \hat{p}_i + w_q \hat{q}_i\|} \quad \text{และ} \quad w_p + w_q = 1.0 \quad (5.16)$$

โดยทั่วไปแล้วขั้นตอนวิธีจะกำหนดให้ตัวคูณทั้งสองมีขนาดเท่ากันคือ $w_p = 0.5$ และ $w_q = 0.5$ ซึ่งใช้ได้กับใบไม้หลายชนิด แต่สำหรับใบไม้บางประเภทแล้วมีความจำเป็นที่จะต้องปรับพารามิเตอร์นี้ รูปที่ 102 แสดงผลจากการปรับพารามิเตอร์ การใช้ตัวคูณทั้งสองที่มีขนาดเท่ากันได้ผลคล้ายกับเส้นใบของพืชใบเลี้ยงคู่ การเพิ่ม w_q ทำให้ particle หันเหการเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายลดลงและเคลื่อนที่ไปยังตัวที่ใกล้มากขึ้นมีผลทำให้ลายเส้นเพิ่มความไม่เป็นระเบียบ (chaos) คล้ายกับรอยแยก (crack) ของถ้วยกระเบื้อง ในทางกลับกันเมื่อ w_p เพิ่มขึ้นทำให้ particle หันเหการเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายมากขึ้น ลายเส้นการเคลื่อนที่ของ particle มีความเป็นระเบียบและมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเพิ่มมากขึ้น คล้ายกับเส้นใบของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว



รูปที่ 102 ผลกระทบจากการปรับค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างเป้าหมายและตัวที่ใกล้
(ใช้ 1,200 อนุภาค จัดเรียงแบบ square)

5.8.3 การจัดวางตำแหน่งบนเส้นขอบใบ


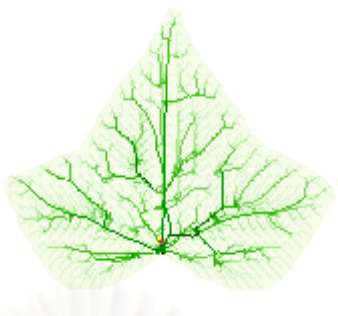










แม้ว่าการวางตำแหน่งทั้งสี่แบบด้วย square, hex, jitter, random ตามผลที่ได้จาก ตาราง 5 , ตาราง 6 และ ตาราง 7 จะได้ให้ผลที่ดี แต่การเพิ่มการจัดวางตำแหน่งแบบที่ห้าคือการจัดวางบนเส้นขอบใบด้วย (จากหัวข้อ 5.5.1) จะช่วยเน้นให้ผลที่ได้มีความสมบูรณ์มากกว่า (รูปที่ 103-b) แบบธรรมดา (รูปที่ 103-a) อย่างไรก็ตามการเลือกใช้หรือไม่ยังคงขึ้นอยู่กับประเภทของใบไม้ และการวางตำแหน่งบนเส้นขอบใบเป็นเพียงการเสริมของการจัดเรียงตำแหน่งภายใน (รูปที่ 103-c) การทดลองนี้แสดงว่าการจัดเรียงอนุภาคไว้ภายในยังมีความจำเป็นเนื่องจากแบบจำลองการขนส่งอนุภาคต้องการจุดเริ่มต้นของอนุภาคจากในหลายๆ ส่วนของพื้นที่ และจะช่วยเสริมโครงสร้างของเส้นใบให้ดูดีขึ้นถ้าจัดวางบนเส้นขอบใบด้วย



รูปที่ 103 ผลจากการจัดวางตำแหน่งบนเส้นขอบใบ

5.9 การเปรียบเทียบแบบจำลองกับใบไม้จริง

เพื่อเป็นการแสดงว่าขั้นตอนวิธีนี้ได้ผลดีและใช้งานได้จริง รูปที่ 104 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองที่สร้างกับใบไม้จริงตามธรรมชาติ ภาพใบไม้ที่พบเห็นได้ทั่วไปนำมาใช้เป็นแบบโดยหาเส้นขอบจากใบไม้ดังกล่าวและนำเส้นขอบที่ได้ให้ขั้นตอนวิธี โดยสามใบแรกไม่ได้ปรับพารามิเตอร์ใดๆ พารามิเตอร์ทั้งหมดกำหนดให้เป็นค่าปกติคือ $20 \text{ particles}/(10\text{pixels})^2$, square, $w_p = 0.5$ และ $w_q = 0.5$ ผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ เส้นใบลำดับที่ 1 มีความใกล้เคียงกับภาพใบไม้จริง ส่วนเส้นใบลำดับที่สองมีการแตกแขนงคล้ายกับภาพใบไม้จริง มีเส้นบางส่วนที่ต่อเชื่อมกันผิดตำแหน่งไปบ้าง สำหรับภาพใบไม้ใบที่ 4 นั้น มีเส้นใบลำดับที่สองเกิดขึ้นจากโคนใบเป็นแนวเดียวกับขอบใบ ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนวิธีนี้ก็เกิดขึ้นเช่นเดียวกันแต่มีความชัดเจนกว่า มีข้อสังเกตว่าใบไม้จริงนั้นไม่ได้เป็นแผ่นเรียบแบน พื้นที่บริเวณขอบมีมากกว่าพื้นที่บริเวณกลางใบ แต่ภาพเส้นขอบที่กำหนดให้ขั้นตอนวิธีนั้นเป็นเส้นขอบที่อยู่ในระนาบสองมิติพื้นที่และระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคจึงมีน้อยกว่าใบไม้จริง ในขณะที่ใบไม้แบบที่สองใบมีความเรียบมากกว่า เส้นใบที่ขั้นตอนวิธีสร้างจึงมีความใกล้เคียงมากกว่า

ใบไม้จริง	แบบจำลอง	แบบจำลอง
		
180x160 Pixels	500 Particles	
		
160x167 Pixels	674 Particles	
		
160x248 Pixels	537 Particles	
		
141x267 Pixels	172 Particles	

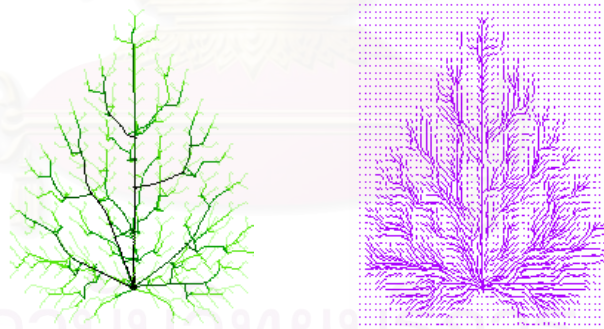
รูปที่ 104 ใบไม้จริง (ซ้าย) เปรียบเทียบกับแบบจำลองใบไม้ (กลางและขวา)

5.10 สีและลวดลาย

ในหัวข้อที่แล้ว เมื่อกำหนดเส้นขอบของใบไม้และได้ผลลัพธ์เป็นเส้นใบที่มีความใกล้เคียงกับเส้นใบไม้จริง ทำให้เป็นที่น่าสนใจว่าเส้นใบของใบไม้นั้นอาจเป็นลักษณะของเส้นของสนามแรงชนิดหนึ่ง โดยธรรมชาติแล้ว เส้นนี้แสดงออกอย่างเห็นได้ชัดทั้งรูปทรงและสีสันทนใบไม้ เช่นเดียวกับรูปร่างของใบไม้เองที่มีลักษณะสี ลักษณะของลายจุดริบบใบไม้หลายชนิดน่าจะแสดงถึงทิศทางการเคลื่อนที่ หรือทิศทางของการเติบโต

ในส่วนนี้แสดงการสร้างใบพลูต่างซึ่งถูกเรียกชื่อให้เป็นราชินีหินอ่อน (Taro Vine, Marble Queen, *Scindapsus aureus*) ตัวใบมีรูปร่างเป็นรูปหัวใจและมีลวดลายคล้ายหินอ่อน มีการเปลี่ยนแปลงสีสรรที่ไม่แน่นอน และที่สำคัญมีจุดริบบใบไม้

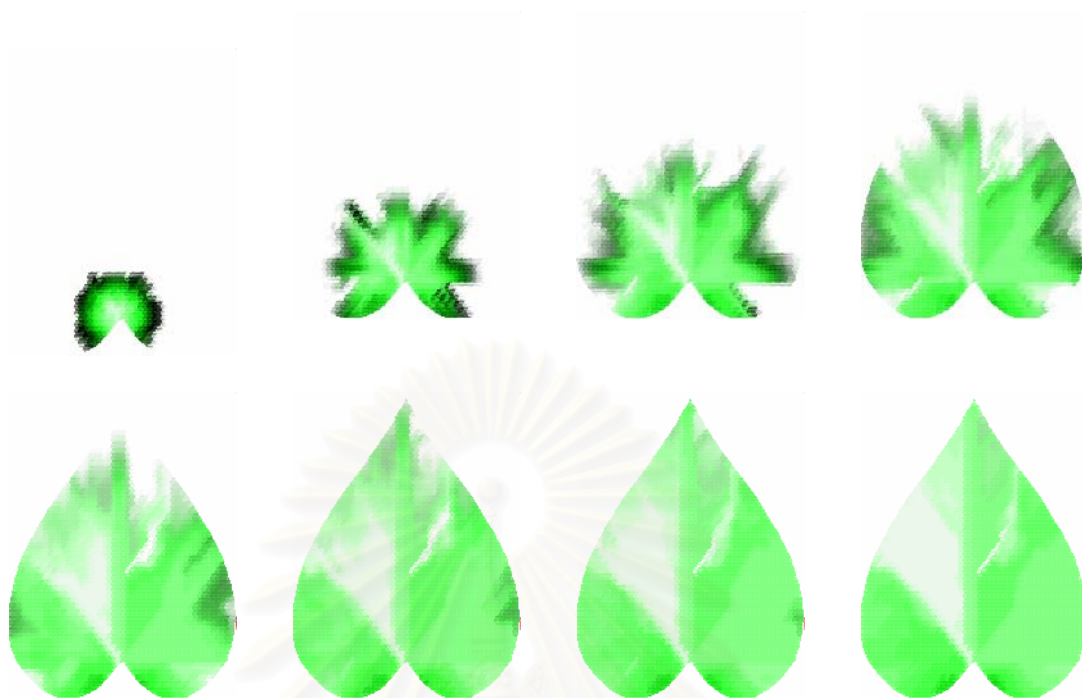
ในการเปลี่ยนจากโครงสร้างของเส้นใบเป็นแผนที่เส้นแรง⁴นั้น ขั้นตอนวิธีได้ถูกปรับปรุงโดยเพิ่มแถวลำดับขนาดสองมิติครอบคลุมพื้นที่รอบแบบจำลองใบไม้ แถวลำดับนี้เก็บเวกเตอร์ตอนเริ่มต้นกำหนดให้เวกเตอร์นี้ไม่มีทิศมีขนาดเป็น 0 เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งต่างๆ ก็จะเหนี่ยวนำให้เวกเตอร์ชี้ไปตามทิศทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ไป เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายจนครบจะได้แผนที่เส้นแรง (รูปที่ 105) แสดงแผนที่เส้นแรง เวกเตอร์ที่มีขนาดเป็น 0 คือจุดต่างๆ รอบใบไม้ เนื่องจากไม่มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านบริเวณนั้น ส่วนเส้นที่มีความยาวมากแสดงว่าอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านและเหนี่ยวนำให้เวกเตอร์มีขนาดมาก



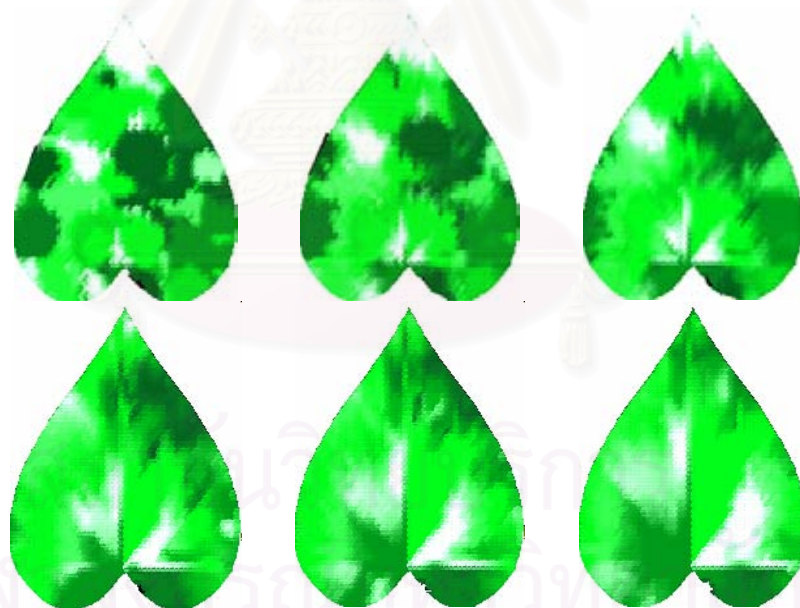
รูปที่ 105 โครงสร้างเส้นใบ (ซ้าย) และแผนที่เส้นแรง (ขวา)

เวกเตอร์ทั้งหมดจะชี้ไปยังทิศที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปนั่นคือเป้าหมายบริเวณโคนใบ การนำแผนที่เส้นแรงไปใช้งานทำได้โดยกลับทิศของเวกเตอร์ทั้งหมด และวางกลุ่มสีลงไปแทนบริเวณโคนใบ (รูปที่ 106) เมื่อคำนวณให้สีมีการเคลื่อนที่ได้ ตามทิศของเวกเตอร์ ในอีกกรณีหนึ่งคือวางสีแบบสุ่มทั่วบริเวณ (รูปที่ 107) และปล่อยให้สีเคลื่อนที่ผสมกัน ในขณะที่สีเคลื่อนที่อยู่นั้นอาจเติมสีลงไปได้อีก หลังจากปล่อยให้สีเคลื่อนที่ไปได้ระยะเวลาหนึ่งนำผลลัพธ์มาปรับแต่งโทนสีธรรมชาติ (รูปที่ 108) และนำไปใช้สร้างแบบจำลอง (รูปที่ 109)

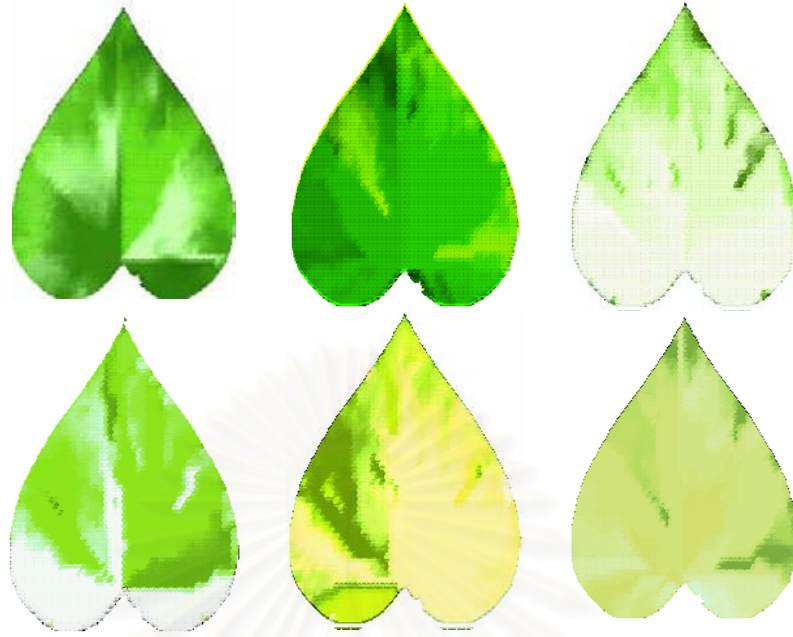
⁴ ในงานวิจัยนี้เรียกว่า แผนที่เส้นแรง หรือ force map



รูปที่ 106 การเคลื่อนที่ของกลุ่มสีตามทิศทางของแรง



รูปที่ 107 การเคลื่อนที่ของกลุ่มสีตามทิศทางของแรง



Taro Vine (Marble Queen) *Scindapsus aureus*.

รูปที่ 108 ภาพใบพลูด่างจากแบบจำลองการเคลื่อนที่ของสี



รูปที่ 109 แบบจำลองพลูด่าง (*Scindapsus aureus*)

5.11 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงระบบขนส่งอนุภาคสำหรับสร้างโครงสร้างเส้นใยไหม เป็นระบบที่ที่เลียนแบบธรรมชาติในการขนส่งสารอาหารและพลังงานจากการสังเคราะห์แสงของใบไหม ระบบขนส่งอนุภาคแสดงแบบจำลองการขนส่งพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อกำหนดเส้นขอบของรูปจากใบไหมจริง แบบจำลองสามารถสร้างเส้นใยไหมในพื้นที่ที่กำหนดที่มีรูปแบบโครงสร้างและมีลักษณะใกล้เคียงกับใบไหมจริงตามธรรมชาติอย่างเห็นได้ชัด การสร้างแผนที่เส้นแรงจากการเคลื่อนที่ของแบบจำลองทำให้สามารถสร้างลวดลายใกล้เคียงกับใบพัดต่าง ดังนั้นโครงสร้างใยไหมที่ซับซ้อนสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองและสมการคณิตศาสตร์ที่เรียบง่าย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การสร้างแบบจำลองพีชด้วยระบบขนส่งอนุภาค

Use the light that is in you to recover your natural clearness of sight.

--- Lao-tzu

ในบทที่ 5 ได้แสดงขั้นตอนวิธีใหม่สำหรับสร้างโครงสร้างของเส้นใยด้วยระบบอนุภาค ซึ่งมีประสิทธิภาพทั้งในด้านความเร็วและคุณภาพ ในด้านความเร็วมีสามารถมากกว่าขั้นตอนวิธีผสม L-systems และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ในด้านคุณภาพได้ผลลัพธ์มีลักษณะใกล้เคียงกับเส้นใยไม้ในธรรมชาติ และสามารถสร้างเส้นใยภายในใยไม้ได้หลายรูปแบบ เมื่อโครงสร้างที่ซับซ้อนและสำคัญของใยไม้นั้นเป็นเพียงส่วนเล็กๆ ของพีช ดังนั้นส่วนอื่นๆ ของพีชก็ควรจะใช้แบบจำลองเดียวกันได้ ในบทนี้ได้นำเสนอแนวคิดที่ใช้หลักของการขนส่งพลังงานสำหรับใยไม้มาปรับปรุงและพัฒนาเพื่อให้ครอบคลุมในส่วนต่างๆ ของพีชโดยเฉพาะลำต้นของพีช ผลลัพธ์ที่ได้แสดงลักษณะใกล้เคียงกับต้นไม้ในธรรมชาติเช่นเดียวกัน

6.1 การนำระบบขนส่งอนุภาคมาใช้ในการสร้างแบบจำลองพีช

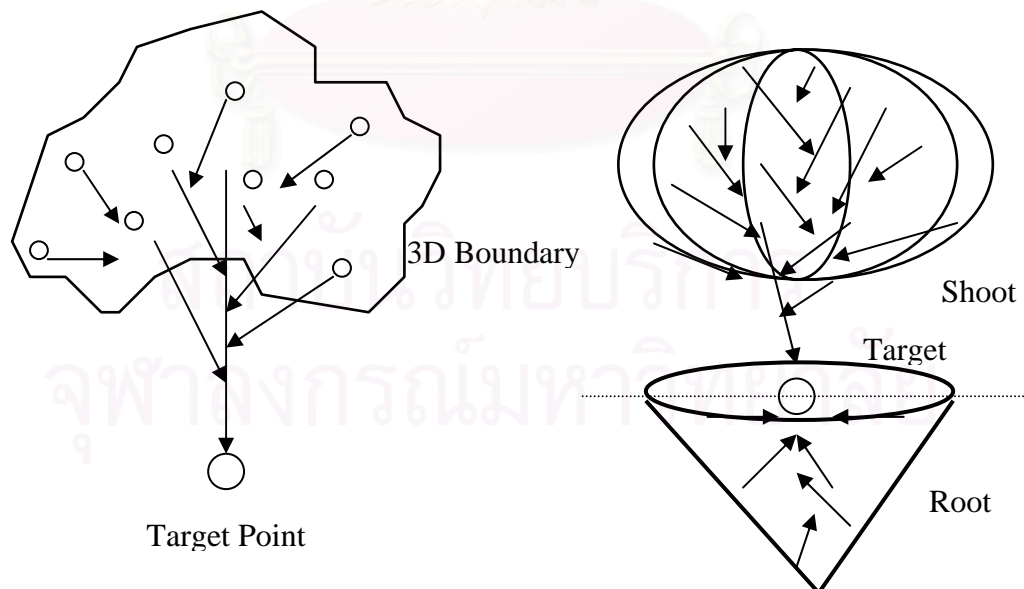
ในบทที่แล้ว ใยไม้สามารถสร้างด้วยระบบขนส่งอนุภาคในมุมมองของการขนส่งพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพที่เป็นโครงสร้างภายในใยไม้จากการสังเคราะห์แสงและการแลกเปลี่ยนก๊าซ ดังนั้น ด้วยเหตุนี้ โครงสร้างของพีช เช่น ลำต้นและส่วนของราก จึงควรมีคุณสมบัติดังกล่าวด้วย ในบทนี้กล่าวถึงการขยายและปรับปรุงให้ระบบขนส่งอนุภาคครอบคลุมแบบจำลองของพีชทั้งต้น โดยเน้นที่ต้นไม้ยืนต้นเป็นหลัก

ในการปรับปรุงให้ระบบขนส่งอนุภาคมีความสามารถในการสร้างแบบจำลองต้นไม้ขึ้นเป็นไปได้อย่างสะดวก โดยใช้แนวคิดเดียวกันของการขนส่งพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ พลังงานที่ผลิตโดยใบไม้มีความจำเป็นที่จะต้องส่งผ่านกิ่งและลำต้นสู่ระบบราก ในทางกลับกันระบบรากต้องการขนส่งสารละลาย แร่ธาตุ และน้ำกลับไปสู่ใบไม้ อันที่จริง ในทางพฤกษศาสตร์แล้ว การขนส่งนั้นเองเป็นพฤติกรรมหลักภายในพืช

การสร้างแบบจำลองพืชด้วยรูปร่างภายนอกนั้นมีประโยชน์มากกว่าการสร้างด้วยการควบคุมจากโครงสร้างภายใน เพราะว่าผู้สร้างแบบจำลองสามารถกำหนดรูปร่างภายนอกที่ต้องการได้ดังเช่นการสร้างภาพของจิตรกรที่วาดโครงสร้างภายนอกก่อน ช่วยให้การจัดองค์ประกอบต่างๆ ทำได้ง่ายขึ้น แม้แต่ตัวอย่างที่ใช้ระบบ L-systems (Prusinkiewicz et al. 2001) ที่สามารถสร้างโครงสร้างของต้นไม้แบบเฉพาะเจาะจงได้ก็ตาม ก็ยังมีความต้องการสร้างต้นไม้โดยคำนึงถึงโครงสร้างภายนอกด้วย ดังนั้นการนำระบบขนส่งอนุภาคมาใช้ในการสร้างแบบจำลองพืชนั้นจึงมีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งในการสร้างแบบจำลองพืชจากโครงสร้างภายนอกเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ

6.2 การปรับปรุงขั้นตอนวิธีระบบขนส่งอนุภาค

ทำได้โดยการปรับปรุง ตำแหน่งของ อนุภาค, เวกเตอร์บอกทิศทาง, เป้าหมาย และเส้นแสดงรูปร่างภายนอก ทั้งหมดให้อยู่ในรูปของสามมิติ (รูปที่ 110)



รูปที่ 110 แบบจำลองสามมิติของระบบขนส่งอนุภาค



รูปที่ 111 แบบจำลองต้นไม้และระบบราก

การสร้างแบบจำลองของต้นไม้และระบบราก (รูปที่ 111) จากระบบขนส่งอนุภาคสามมิติในภาพประกอบด้วยระบบขนส่งอนุภาค 2 ระบบแยกจากกัน คือส่วนของต้นไม้ และส่วนของราก ในส่วนของต้นไม้กำหนดขอบเขตโดยรูปทรงครึ่งวงกลม (รูปที่ 110) ใบไม้ถูกวาดตรงตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาคในส่วนของรากกำหนดขอบเขตรูปกรวยหงาย เป้าหมายของระบบขนส่งอนุภาคทั้งสองคือโคนต้นไม้ การวางตำแหน่งของอนุภาคทั้งหมดใช้วิธีการสุ่ม ส่วนพารามิเตอร์ควบคุมต่างๆ นั้น ใช้อัตราส่วนปกติคือ $w_p = 0.5$ และ $w_q = 0.5$ เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ไปนั้นเส้นทางถูกใช้เป็นกิ่ง ส่วนของลำต้น และราก ผลลัพธ์ที่ได้แสดงว่าระบบขนส่งอนุภาคทำงานได้เป็นอย่างดี

ทั้งนี้ มีพารามิเตอร์บางตัวเพิ่มขึ้นมาสำหรับการปรับปรุงให้เป็นสามมิติ เช่น ความหนาของกิ่ง ความโค้งของกิ่ง ขอบเขตสามมิติ การจัดเรียงในลักษณะสามมิติที่คำนึงถึงความหนาแน่นของใบที่มีผลกระทบต่อทิศทางของแสง รายละเอียดของพารามิเตอร์เหล่านี้ จะอธิบายในส่วนตัวต่อไป

6.3 ความหนาของลำต้นและกิ่งไม้

การกำหนดความหนาของกิ่งไม้ยังคงขึ้นอยู่กับพลังงานที่อนุภาคแต่ละตัวได้รับและขนส่งผ่านไป เนื่องจากการกำหนดให้อนุภาคต่างๆ ตัวเคลื่อนที่ได้ในอัตราที่เท่ากันไม่ว่าจะมีพลังงานเท่าใด ดังนั้นเส้นทางที่อนุภาคที่มีพลังงานมากเคลื่อนที่ได้จึงควรมีความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าอนุภาคที่มีพลังงานน้อย จึงกำหนดให้รัศมีของกิ่งไม้ ดังนี้

$$r_i = \delta + \gamma e_i \quad (6.1)$$

$$r_j = \delta + \gamma e_j \quad (6.2)$$

และ

$$r_{ij} = \delta + \gamma e_{ij} \quad (6.3)$$

เมื่อ

e_i เป็นค่าพลังงานของอนุภาคตัวที่ i

e_j เป็นค่าพลังงานของอนุภาคตัวที่ j

e_{ij} เป็นพลังงานของอนุภาคที่ i และ j รวมตัวกันและพลังงานไม่มีการสูญหาย

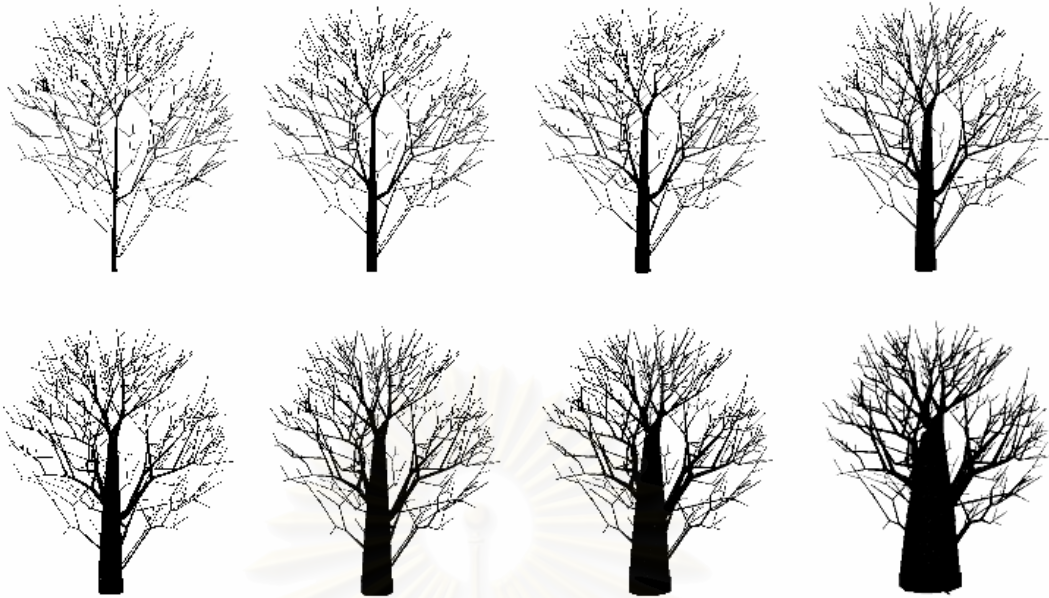
$$e_{ij} = e_i + e_j \quad (6.4)$$

ให้ δ เป็นค่าแทนรัศมีที่น้อยที่สุดของกิ่งไม้ และ γ เป็นค่าอัตราส่วนของความหนา⁶

จากการสังเกต (รูปที่ 112) อัตราส่วน γ ประมาณ 0.7 หรือ 1.0 มีความเหมาะสมกับต้นไม้ทั่วไป เมื่อเพิ่มอัตราส่วนมากขึ้น เช่น 2.0 และ 3.0 ดูคล้ายต้นไม้ใหญ่ที่มีอายุมากหลายพันปี

⁵ มีการกำหนดแบบอื่น เช่น $a^x + b^x = c^x$ (J.D. Murray 1989) เมื่อ a^x และ b^x คือรัศมีของกิ่งย่อย c^x คือรัศมีของกิ่งหลัก และ x มีค่าประมาณในช่วง 1.0-2.0

⁶ เนื่องจากเป็นสมการที่รัศมีขึ้นอยู่กับพลังงาน (1 มิติ) ไม่ได้ใช้รัศมีขึ้นอยู่กับปริมาตรของพื้นที่หน้าตัด (2 มิติ) และเพื่อให้สมการมีความง่ายจึงกำหนดเช่นนั้น



รูปที่ 112 อัตราส่วนความหนาที่แตกต่างกัน 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0 และ 3.0 (จากซ้ายไปขวาและบนลงล่าง)

6.4 ความโค้งของกิ่งไม้

เมื่อใช้เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคสำหรับสร้างกิ่งไม้ เส้นทางดังกล่าวมีลักษณะเลี้ยวไปมา เนื่องจากทิศทางของอนุภาคที่ใกล้ที่สุดมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ และในบางกรณีทิศทางของอนุภาคที่ใกล้ที่สุดมีการสลับกันไปมาอย่างเห็นได้ชัด ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ กิ่งไม้ที่ได้มีความคดเคี้ยวไปมาไม่สวยงาม เปรียบเทียบภาพต้นไม้ในรูปที่ 113 ซ้ายมือ และ ขวามือ ภาพทางซ้ายมือใช้เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบปกติทำให้กิ่งไม้ที่ได้มีความโค้งไปมา ส่วนภาพทางขวามือใช้เส้นตรงระหว่างจุดที่อนุภาคเกิดการเชื่อมต่อกันสองจุด ทำให้ได้ภาพต้นไม้ที่มีกิ่งตรง การเลือกใช้แบบใดขึ้นอยู่กับลักษณะของต้นไม้ หากต้องการให้กิ่งไม้มีพื้นผิวที่ดูขรุขระอาจจะใช้แบบแรกซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ขั้นตอนวิธีอื่นๆ เพิ่มเติม ตัวอย่างเช่นในงานของ Chover (1995) ได้เพิ่มสมการเพื่อเพิ่มความขรุขระของลำต้น (หัวข้อ 2.1.5.11) เป็นต้น



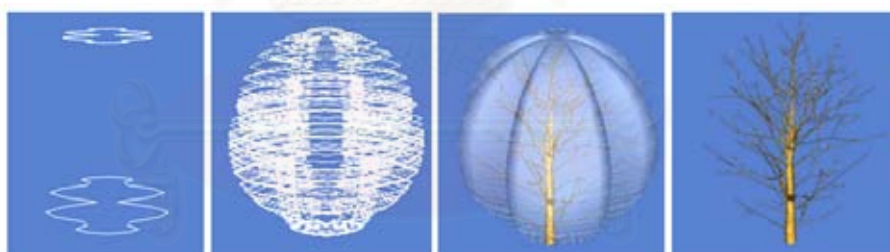
รูปที่ 113 ความโค้งของกิ่ง เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (ซ้าย) เส้นทางการเชื่อมต่อของอนุภาค (ขวา)

6.5 รูปร่างและขอบเขตสามมิติ

ขอบเขตสามมิติของต้นไม้กำหนดโดยเขตของระนาบรวมอยู่ในรูปของโพลีกอน ขอบเขตแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ ขอบเขตภายนอก และ ขอบเขตภายใน การกำหนดขอบเขตทั้งหมดใช้วิธีกำหนดขอบเขตภายนอกจากนั้นลบออกด้วยขอบเขตภายใน ซึ่งการกำหนดขอบเขตด้วยวิธีนี้สามารถกำหนดขอบเขตรูปทรงใดๆ

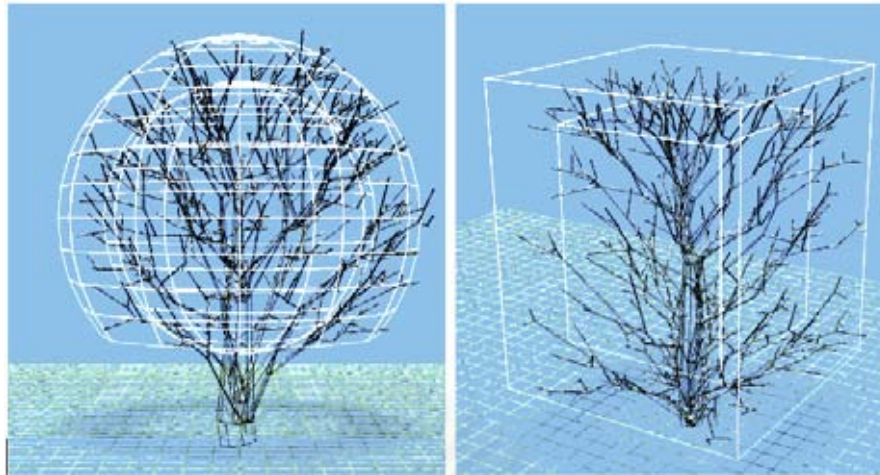
6.5.1 การทดสอบจุดภายในขอบเขต

การจัดวางอนุภาคต้องวางลงภายในขอบเขตที่กำหนด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการทดสอบว่าจุดดังกล่าวอยู่ในขอบเขตที่กำหนดหรือไม่ ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีทดสอบส่วนตัดขวางในแนวระนาบ X-Z จากขอบเขตสามมิติ เมื่อได้ขอบเขตในระนาบสองมิติมาจึงทดสอบอีกครั้งหนึ่ง รูปที่ 114 แสดงขอบเขตและส่วนตัดขวาง การทดสอบนี้สามารถทำงานได้ดีแม้ในขอบเขตที่มีความซับซ้อน สำหรับการทดสอบขอบเขตภายนอก และ ขอบเขตภายในนั้นทำการทดสอบสองครั้ง ทำให้ตำแหน่งอยู่ในบริเวณตรงกลางระหว่างขอบเขตทั้งสอง ในรูปที่ 115 ซึ่งวิธีนี้ช่วยเพิ่มความสมจริงมากขึ้นเนื่องจากบริเวณภายในต้นไม้ไม่มีใบไม้ ภายหลังจากการทดสอบแล้วจุดที่ได้จะเพิ่มด้วยตำแหน่งค่าสุ่มเล็กน้อย เพื่อไม่ให้ดูเป็นรูปทรงเรขาคณิตมากเกินไป



รูปที่ 114 ตัวอย่างส่วนตัดขวาง (ซ้าย) ส่วนตัดขวางทั้งหมดของการทดสอบ (ซ้ายกลาง) ภายหลังจากการทดสอบ ตำแหน่งจุดทั้งหมดที่อยู่ภายในขอบเขต สร้างเป็นต้นไม้ (ขวากลาง และขวา)

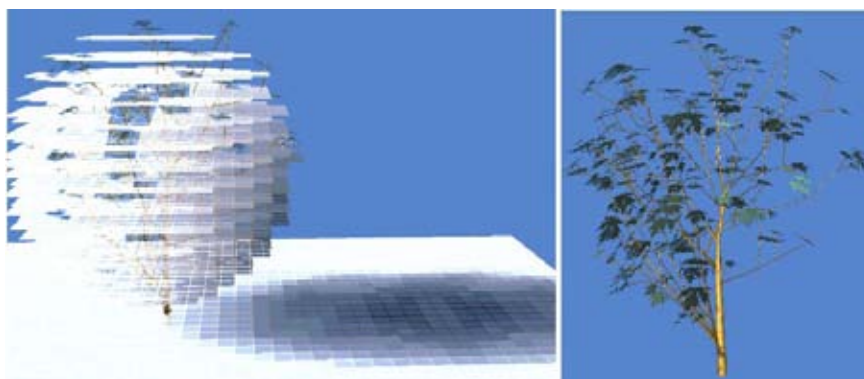
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 115 ต้นไม้ที่เกิดจากตำแหน่งของอนุภาคระหว่าง ขอบเขตภายนอกและขอบเขตภายในทรงกลม (ซ้าย) และทรงสี่เหลี่ยม (ขวา) มีตำแหน่งของอนุภาคบางส่วนเกินออกมาเนื่องจากการสุ่มเพิ่มเติมภายหลังการทดสอบขอบเขต

6.6 แสงและความหนาแน่นของจุด

ตำแหน่งของใบไม้มีการจัดวาง (phyllotaxis) อย่างเหมาะสมเพื่อให้รับแสงได้มากที่สุดโดยไม่เกิดการบังแสงซึ่งกันและกัน ใบไม้มีการหันเข้าหาแสงเช่นเดียวกับการงอกของกิ่ง ตำแหน่งสำหรับการจัดวางใบไม้ภายในขอบเขตสามมิติจึงต้องคำนวณว่าจุดใดจะได้รับปริมาณแสงเท่าใด และจัดวางใบไม้ลงในตำแหน่งตามปริมาณของแสงที่ได้รับ การคำนวณแบ่งพื้นที่สามมิติออกเป็นกล่อง (block) เล็กๆ และเก็บข้อมูลอยู่ในรูปของแถวลำดับสามมิติ สำหรับเก็บค่าความเข้มของแสง ภายในพื้นที่ข้างในของขอบเขตกำหนดให้มีลักษณะกึ่งทึบกึ่งโปร่งแสง (semi-transparent) เพื่อให้แสงลอดผ่านได้บ้าง การคำนวณใช้วิธี ray-tracing (A. Watt 2000, A. Watt and M. Watt 1992) เพื่อหาว่าแต่ละส่วนมีแสงผ่านเป็นจำนวนเท่าใด เมื่อคำนวณแล้ว ข้อมูลแถวลำดับสามมิติถูกใช้ในการคำนวณหาอัตราจำนวนการวางจุดในแต่ละกล่อง ความหนาแน่นของอนุภาคที่ใช้แทนใบไม้ขึ้นอยู่กับปริมาณของแสงที่จะได้รับ เมื่อมีแสงจำนวนมาก โอกาสที่จะมีใบไม้เกิดขึ้นก็มีมาก บริเวณที่ได้รับแสงน้อยจึงไม่มีใบไม้เกิดขึ้น



รูปที่ 116 การคำนวณแสงภายในแถวลำดับสามมิติ (ซ้าย) แบบจำลองต้นไม้ที่ขึ้นกับปริมาณแสงที่ได้รับ (ขวา)

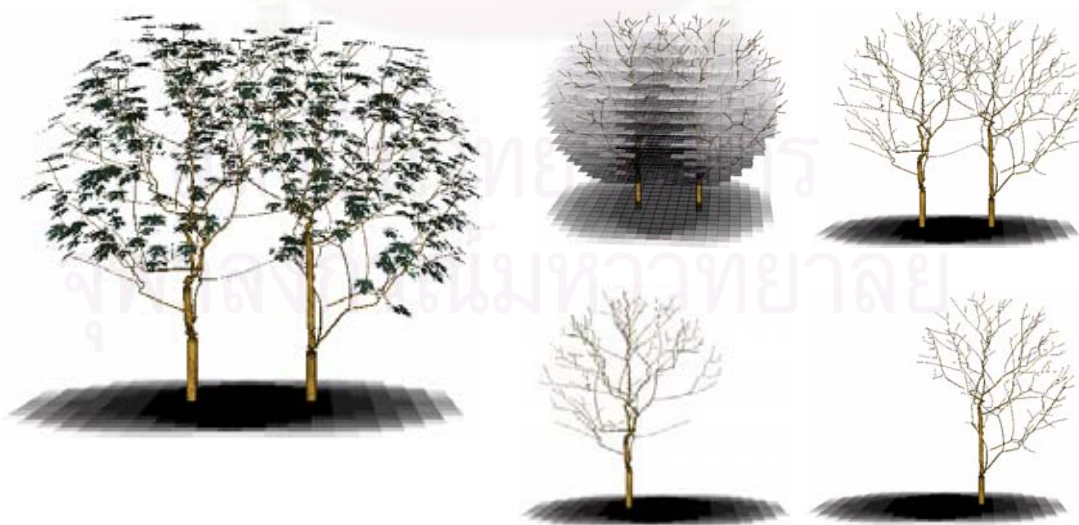
รูปที่ 116 ซ้าย แสดงแถวลำดับสามมิติที่ใช้สำหรับการคำนวณ แผ่นสีขาว เทาหรือดำแต่ละแผ่นแทนกล่อง สีขาวแสดงว่าได้รับแสงมากที่สุด สีเทาได้รับแสงเพียงบางส่วน และสีดำแสดงว่าได้รับแสงน้อยหรือไม่ได้รับแสงเลย ในส่วนที่ว่างอื่นๆ นั้นมีกล่องเช่นเดียวกันแต่ไม่ได้แสดงไว้ในส่วนของเงาที่เกิดขึ้นบนพื้นนั้นมีความมืดไม่เท่ากันเนื่องจากคุณสมบัติกึ่งโปร่งแสงทำให้ใน ส่วนบริเวณใจกลางจะมีสีมืดกว่าบริเวณขอบนอกเพราะแสงเดินทางผ่านส่วนใจกลางของทรงกลมเป็นระยะทางมากกว่า การคำนวณโดยใช้วิธีนี้ทำให้เกิดเงาขึ้นภายใน (self-shadow effect) ของขอบเขตของรูปทรงที่กำหนดด้วย เมื่อกำหนดให้ความหนาแน่นของอนุภาคขึ้นอยู่กับปริมาณแสงที่ได้รับทำให้รูปที่ 116 ขวา ไม่ปรากฏใบไม้บริเวณด้านขวาล่าง แบบจำลองที่ได้ นี้ (รูปที่ 117) มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากตำแหน่งการจัดวางของอนุภาคเท่านั้น ส่วนการควบคุมการเคลื่อนที่ของอนุภาคยังคงเป็นไปตามระบบขนส่งอนุภาคตามเดิม จากการสังเกตพบว่าส่วนแกนกลางของลำต้นยังคงเป็นเส้นตรงอยู่ในเส้นทางบริเวณเดิม แม้ว่ากิ่งไม้ที่ได้จะไม่สมดุลเนื่องจากไม่มีใบไม้ด้านขวาล่าง



รูปที่ 117 การเคลื่อนที่ของอนุภาคบนแบบจำลองที่มีผลจากของปริมาณแสงที่ได้รับ

6.7 แบบจำลองที่ตอบสนองต่อสภาพแวดล้อม

ด้วยระบบขนส่งอนุภาคและการคำนวณปริมาณแสงจึงสามารถสร้างภาพต้นไม้คู่ที่อยู่ใกล้เคียงกันได้ (รูปที่ 118) เนื่องจากเงาที่เกิดขึ้นระหว่างต้นไม้ทั้งสองทำให้ไม่มีกิ่งไม้ในบริเวณส่วนกลาง แบบจำลองที่ได้มีลักษณะคล้ายกับงานของ R. Mech and P. Prusinkiewicz (1996) (หัวข้อ 2.1.5.9)



รูปที่ 118 ต้นไม้คู่

6.7.1 ศิลปะการตัดแต่งรูปทรงพุ่มไม้ (Topiary Modeling)

ขั้นตอนวิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้กับการตัดแต่งรูปพุ่มรูปร่างต่างๆ ได้อย่างอัตโนมัติ (รูปที่ 119) เนื่องจากการกำหนดขอบเขตที่สามารถกำหนดให้เป็นรูปร่างอย่างไรก็ได้ ในการกำหนดขอบเขตสามารถกำหนดให้มีรูปร่างที่ซับซ้อนได้ รูปที่ 120 ประกอบด้วยขอบเขตทั้งหมด 7 รูปทรงคือ ส่วนหัว ส่วนคอ ส่วนลำตัว และ ส่วนขาทั้งสิ้น



รูปที่ 119 ต้นไม้ตัดแต่งเป็นรูปทรงกลม

รูปที่ 120 ต้นไม้รูปสัตว์

การสร้างต้นไม้รูปร่างต่างๆ สามารถทำได้โดยง่าย รูปที่ 121 แสดงต้นไม้ที่มีทรงพุ่มรูปร่างต่างๆ กัน เช่นรูปทรงกลม รูปกรวยคว่ำ รูปทรงกระบอก หรือรูปทรงกรวยซ้อน ซึ่งต้นไม้รูปทรงเหล่านี้สามารถพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ ส่วนรูปทรงสี่เหลี่ยมนั้นเกิดจากการตัดแต่ง ขั้นตอนวิธีนี้ยังสามารถประยุกต์เข้ากับฉากต่างๆ ได้ ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 122 ประกอบด้วยต้นไม้รูปทรงกลมที่ขึ้นอยู่ข้างอาคาร ทิศทางของเงาที่เกิดขึ้นจากตัวอาคารมีผลกับการคำนวณปริมาณแสงที่ได้รับของต้นไม้

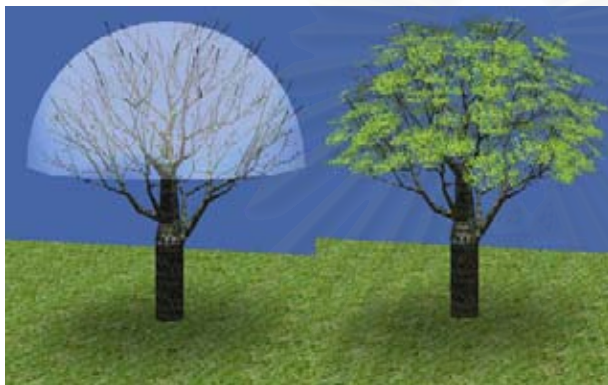
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



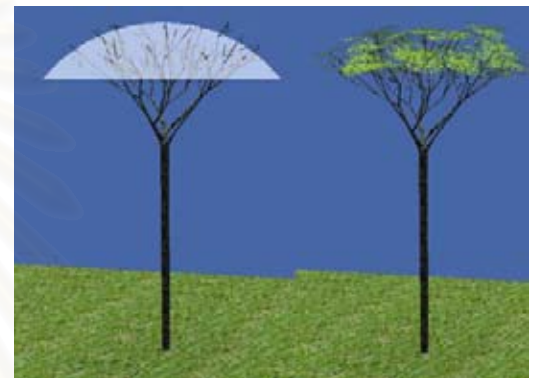
(a) The sphere shape



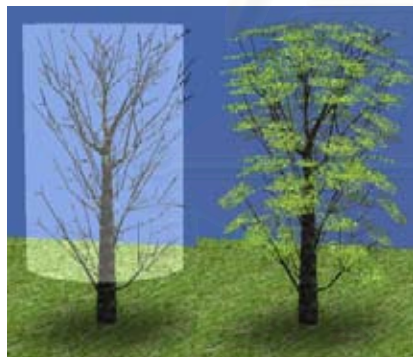
(b) The sphere shape 75%



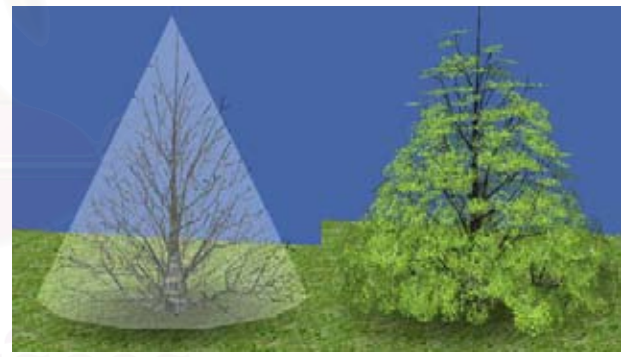
(c) The sphere shape 50%



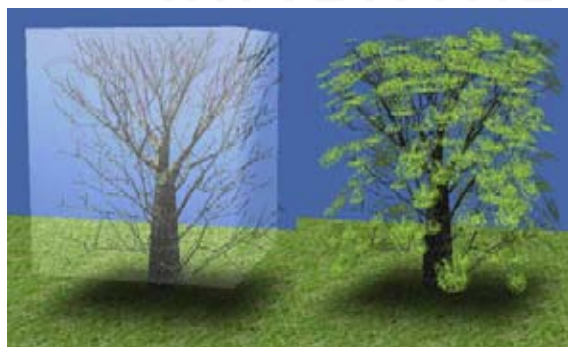
(d) The sphere shape 25%



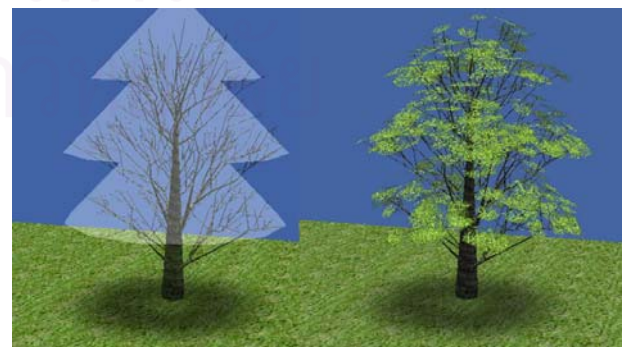
(e) The tube shape



(f) The cone shape



(g) The cubic shape



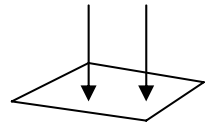
(h) The stack cone shape

รูปที่ 121 ต้นไม้สร้างจากรูปทรงเรขาคณิตแบบต่าง ๆ



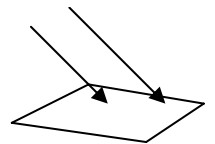
(a)

ทิศทางของ
แสง



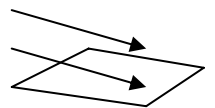
(b)

ทิศทางของ
แสง



(c)

ทิศทางของ
แสง



รูปที่ 122 แบบจำลองต้นไม้และอาคาร(แสดงผลกระทบของแสงเงาจากวัตถุอื่นในฉาก)

6.8 การวัดความเร็วในการสร้างภาพ

การทดสอบฉากทั้งสี่ประกอบด้วย ฉากที่ 1 ต้นไม้ 1 ต้น ฉากที่ 2 ต้นไม้ 1 ต้น ฉากที่ 3 ต้นไม้รูปสัตว์ ฉากที่ 4 ต้นไม้ 10 ต้น (รูปที่ 123) การทดสอบทำงานบน CPU Intel Pentium-III 667Mhz Ram 256M with OpenGL1.2 GeForce2GTS 64Mb และ MS Windows 98 โปรแกรมพัฒนาโดยใช้ Delphi และเรียกใช้ชุดคำสั่ง OpenGL สำหรับการแสดงผล

รายละเอียดของขั้นตอนวิธีสำหรับการสร้างแบบจำลองมีดังนี้

- *Setting up class* - เป็นเวลาที่ใช้สำหรับการสร้างคลาสใหม่เพื่อกำหนดขอบเขตและรองรับข้อมูลที่เกิดขึ้นจากระบบอนุภาคซึ่งการสร้างคลาสนี้ทำโดยระบบปฏิบัติการ
- *Setting up Geometry Boundary* - เวลาที่ใช้สำหรับการกำหนดข้อมูลขอบเขตสามมิติให้กับระบบ
- *Setting up Light Boundary* - เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนข้อมูลขอบเขตที่กำหนดให้เป็นแถวลำดับสามมิติ สำหรับการคำนวณแสง ในขั้นตอนนี้อาจกำหนดว่าแถวลำดับใดมีความโปร่งใสเท่าใด
- *Raytracing* - เวลาที่ใช้ในกระบวนการ ray-trace
- *Scattering Particle by Light Density[x]* - เวลาที่ใช้สำหรับการจัดวางตำแหน่งของอนุภาคแบบสุ่มโดยอัตราการวางของอนุภาคต่อพื้นที่ขึ้นอยู่กับปริมาณแสงที่คำนวณไว้ในขั้นตอนก่อนหน้านี้ สัญลักษณ์ x แทนหมายเลขของต้นไม้
- *Particle System[x] : Painting Leaves* - เวลาที่ใช้สำหรับการสร้างใบไม้ในตำแหน่งที่ particle ปรากฏ ใบไม้เป็นรูปหลายมุม (polygon) สามมิติ
- *Particle System[x] : Moving* - เวลาที่ใช้สำหรับการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามกฎที่กำหนดไปยังเป้าหมาย
- *Particle System[x] : OpenGL Geometric Modeling* - เวลาที่ใช้สำหรับการสร้างกิ่งไม้และลำต้นโดยใช้ข้อมูลจากเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคทั้งหมด
- *Calculating surfaces normal* - เวลาที่ใช้สำหรับการคำนวณเส้นปกติของพื้นผิว (surfaces normal).

จากการวัดพบว่าฉากที่ 1 2 และ 3 ใช้เวลาโดยรวมน้อยกว่า 1 นาที และฉากที่ 4 ใช้เวลาโดยรวมประมาณ 2 นาที⁷

⁷ หมายเหตุ ขั้นตอนวิธีนี้ยังสามารถปรับปรุงสำหรับระบบเครือข่ายได้ เช่นการแบ่งพื้นที่สำหรับการคำนวณแสงออกเป็นส่วนย่อยๆ และภายหลังจากการคำนวณแสงแล้ว อาจกำหนดให้เครื่องแต่ละเครื่องรับหน้าที่คำนวณระบบขนส่งอนุภาคของต้นไม้แต่ละต้นและส่งผลลัพธ์เป็นข้อมูลของโพลีกอนสามมิติกลับมาแสดงผล ซึ่งจะลดเวลารวมที่ต้องใช้สำหรับการคำนวณได้อีกมาก

ตาราง 8 เวลาที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสำหรับฉากที่ 1

<i>Scene#1: 1 Tree 1 Light</i>	<i>Total (s)</i>	<i>Duration (s)</i>
Setting up class ⁸ *	00.000	04.180
Setting up Geometry Boundary	04.180	00.000
Setting up Light Boundary..	04.180	00.770
Raytracing..	04.950	01.100
Scattering Particle by Light Density[1]..	06.050	00.880
Particle System[1] : Painting Leaves..	06.930	00.760
Particle System[1] : Moving..	07.690	01.540
Particle System[1] : OpenGL Geometric Modeling ..	09.230	00.830
Calculating normal..	10.060	00.050
Overall	10.110	-

Total 371 Particles 100 Iterations 9,399 Vertices 3,534 Surfaces

ตาราง 9 เวลาที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสำหรับฉากที่ 2

<i>Scene#2: TwinTree 9 Lights</i>	<i>Total (s)</i>	<i>Duration (s)</i>
Setting up class*	00.000	00.660
Setting up Geometry Boundary	00.660	00.110
Setting up Light Boundary..	00.770	01.100
Raytracing..	01.870	07.910
Scattering Particle by Light Density[1]..	09.780	00.770
Particle System[1] : Painting Leaves..	10.550	00.550
Particle System[1] : Moving..	11.100	01.040
Particle System[1] : OpenGL Geometric Modeling ..	12.140	00.660
Scattering Particle by Light Density[2]..	12.800	00.770
Particle System[2] : Painting Leaves..	13.570	01.700
Particle System[2] : Moving..	15.270	01.210
Particle System[2] : OpenGL Geometric Modeling ..	16.480	00.770
Calculating normal..	17.250	00.000
Overall	17.250	-

Total 686 Particles 213 Iterations 16,655 Vertices 6,350 Surfaces

ตาราง 10 เวลาที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสำหรับฉากที่ 3

<i>Scene#3: the Monster 9 Lights</i>	<i>Total (s)</i>	<i>Duration (s)</i>
Setting up class*	00.000	00.660
Setting up Geometry Boundary	00.660	01.370
Setting up Light Boundary..	02.030	04.340
Raytracing..	06.370	07.960
Scattering Particle by Light Density[1]..	14.330	06.100
Particle System[1] : Painting Leaves..	20.430	03.960
Particle System[1] : Moving..	24.390	06.920
Particle System[1] : OpenGL Geometric Modeling ..	31.310	04.830
Calculating normal..	36.140	00.050
Overall	36.190	-

Total 893 Particles 133 Iterations 21,971 Vertices 8,340 Surfaces

⁸ เป็นการสร้างคลาสใหม่ซึ่งต้องการจองหน่วยความจำโดยระบบปฏิบัติการ(operating system)จึงใช้เวลาไม่แน่นอน (ตัวอย่างเช่น คำสั่ง `dummy = classdummy.create();` ในภาษา Delphi-Pascal หรือ `dummy = new classdummy();` ในภาษา C++)

ตาราง 11 เวลาที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสำหรับฉากที่ 4

<i>Scene#4: Avenue 10 Trees 49 Lights</i>	<i>Total (s)</i>	<i>Duration (s)</i>
Setting up class*	00.000	00.660
Setting up Geometry Boundary	00.660	02.640
Setting up Light Boundary..	03.300	05.490
Raytracing..	08.790	41.250
(Particle Systems 10 times)	50.040	52.180
Calculating normal..	82.220	00.050
Overall	82.270	

Total 2,295 Particles 1,002 Iterations 57,424 Vertices 21,681 Surfaces



ฉากที่ 1 ต้นไม้ 1 ต้น (10.11 วินาที)

(a)



ฉากที่ 2 ต้นไม้ 2 ต้น (17.25 วินาที)

(b)



ฉากที่ 3 ต้นไม้รูปสัตว์ (36.19 วินาที)

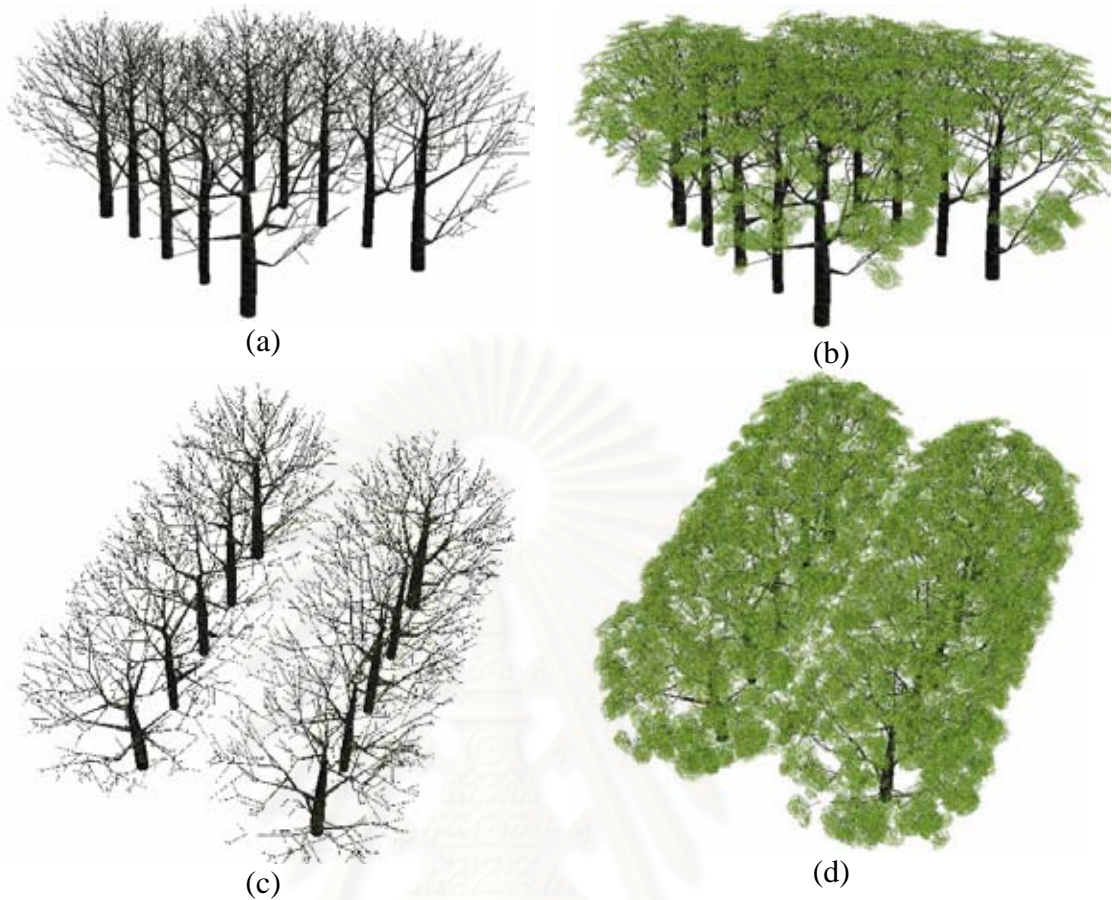
(c)



ฉากที่ 4 ต้นไม้ 10 ต้น (1 นาที 42.27 วินาที)

(d)

รูปที่ 123 ฉากที่ใช้ทดสอบ ทั้งสี่ฉากประกอบด้วย (a) ต้นไม้ 1 ต้น (b) ต้นไม้ 2 ต้น (c) ต้นไม้รูปสัตว์ และ (d) ต้นไม้ 10 ต้น



ฉากที่ 4 ต้นไม้ 10 ต้น (1 นาที 42.27 วินาที)

รูปที่ 124 ฉากที่ใช้ทดสอบ ฉากที่ 4 ต้นไม้ 10 ต้น ในมุมมองต่าง ๆ แสดงโครงสร้างลำต้น(a,c) และแสดงต้นไม้(b,d)

6.9 การสร้างแบบจำลองต้นไม้เลียนแบบจากต้นไม้จริง

การสร้างแบบจำลองต้นไม้จากภาพถ่ายต้นไม้เหล่านั้นสามารถทำได้ (รูปที่ 125 และ รูปที่ 126) วิธีการสร้างแบบจำลองเริ่มจากการนำภาพถ่ายต้นไม้ที่ต้องการ มากำหนดขอบเขตของทรงพุ่มไม้และตำแหน่งโคนต้นไม้เหล่านั้นก่อน เมื่อจัดวางอนุภาคในขอบเขตที่กำหนดและให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งโคนต้นไม้ ก็จะได้แบบจำลองต้นไม้เลียนแบบจากต้นไม้จริงตามต้องการ

ถ้าหากไม่รวมการกำหนดลักษณะของภาพพื้นผิว(Texture)ของแบบจำลองแล้ว ลักษณะของผลลัพธ์ที่ได้จากการสังเกตพบว่า ตัวโครงสร้างของต้นไม้ที่ได้จากแบบจำลองมีลักษณะใกล้เคียงกันกับต้นไม้จริง อย่างไรก็ตามกิ่งไม้ในแบบจำลองที่ยังมีลักษณะความโค้งไม่เหมือนกับต้นไม้

จริง และรูปแบบการจัดวางของใบไม้และขนาดของใบไม้ในแบบจำลองยังคงต้องปรับปรุงเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะตามชนิดของต้นไม้

จากการทดลองสร้างแบบจำลองพบจุดสำคัญของการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีนี้เพื่อให้มีความเหมือนจริงมากที่สุดก็คือ การกำหนดขอบเขตทรงพุ่มให้ใกล้เคียงกับต้นไม้จริงมากที่สุดและตำแหน่งของโคนต้นที่ต้องมีตำแหน่งสัมพันธ์กันกับขอบเขตทรงพุ่มตามตำแหน่งของต้นไม้จริง ถ้ากำหนดขอบเขตทรงพุ่มได้เหมือนจริง แต่จัดวางตำแหน่งโคนต้นไม้ถูกต้อง ลักษณะของโครงสร้างของต้นไม้ที่ได้ในแบบจำลองก็จะแตกต่างออกไป



(a)



(b)

รูปที่ 125 ภาพถ่ายต้นไม้แบบที่ 1 (a) และ ต้นไม้จากแบบจำลองแบบที่ 1 (b)



(a)



(b)

รูปที่ 126 ภาพถ่ายต้นไม้แบบที่ 2 (a) และ ต้นไม้จากแบบจำลองแบบที่ 2 (b)

6.10 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการนำระบบขนส่งอนุภาคมาปรับปรุงเพื่อใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองพีช ด้วยแนวคิดและแรงบันดาลใจจากธรรมชาติเกี่ยวข้องกับการขนส่งซึ่งเป็นพฤติกรรมหลักภายในพีชและการขนส่งพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ พลังงานที่ผลิตโดยไบโม่มีความจำเป็นที่จะต้องส่งผ่านกึ่งและลำต้นสู่ระบบราก ในทางกลับกันระบบรากต้องการขนส่งสารละลาย แร่ธาตุ และน้ำกลับไปสู่ไบโม่ ทำให้เกิดแบบจำลองสร้างเส้นไบโม่และเชื่อมโยงถึงแบบจำลองสร้างโครงสร้างต้นไม้ในที่สุด ขั้นตอนวิธีนี้ยังสามารถสร้างแบบจำลองพีชโดยคำนึงถึงปริมาณแสงที่ได้รับหรือโครงสร้างภายนอกจากการศิลปการตัดแต่ง ทำให้ระบบขนส่งอนุภาคเป็นขั้นตอนวิธีสำหรับใช้สร้างแบบจำลองพีชที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ดี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

สรุป

*Look deep into nature, and then you
will understand everything better.*

--- Albert Einstein
American (German-born)
theoretical physicist (1879 - 1955)

ในบทนี้กล่าวถึงผลที่ได้รับจากงานวิจัย กล่าวสรุปงานวิจัยโดยย่อ และข้อเสนอแนะและปัญหา
ทั่วไป สำหรับผู้สนใจที่ต้องการการปรับปรุงขั้นตอนวิธีนี้เพิ่มเติมในอนาคต

7.1 งานวิจัยนี้ได้นำเสนอสิ่งใหม่ดังนี้

7.1.1 Tag-Functions

เป็นแนวคิดใหม่⁹ที่ใช้สำหรับควบคุมและปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ภายในระบบ L-systems จาก
เดิมที่ใช้พารามิเตอร์ควบคุมที่ซับซ้อนใน parametric L-systems มาเป็นการใช้ Tag-Functions
เพื่อลดรูปของฟังก์ชัน ให้อยู่ในรูปการทำเครื่องหมายบอกตำแหน่งบนฟังก์ชันเส้นโค้ง spline
ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ Tag-Functions มีดังนี้

- **ลดรูปของสมการที่ซับซ้อน** - เปลี่ยนรูปสมการซับซ้อนไปอยู่ในรูปของสมการ spline
curve ที่ควบคุมด้วยพารามิเตอร์เพียง 4 ตัว

⁹ Tag-Functions ตีพิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 2000 (Y. Rodkaew et al. 2000) ต่อมา P. Prusinkiewicz ได้ตีพิมพ์การควบคุม
พารามิเตอร์ลักษณะเดียวกันเรียกว่า positional function ในปีค.ศ. 2001 (P. Prusinkiewicz et al. 2001)

- **ช่วยลดเวลาจากการปรับพารามิเตอร์** - ในการปรับพารามิเตอร์ไม่จำเป็นต้องใช้ L-systems/L-parser ทำงานวนซ้ำเพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ใหม่ เมื่อปรับพารามิเตอร์ของ Tag-Function แล้วสามารถใช้ผลที่ได้จาก L-parser เดิมได้
- **สื่อความหมายดีกว่า** - การปรับพารามิเตอร์ของ tag function สื่อความหมายได้ง่ายกว่า สัมประสิทธิ์ของสมการธรรมดา การปรับพารามิเตอร์ทำได้ง่าย เห็นภาพของฟังก์ชันชัดเจน
- **ประหยัดกว่า** - ชุดคำสั่งที่ใช้ tag function สั้นกว่า สะดวกและกระทัดรัดกว่า

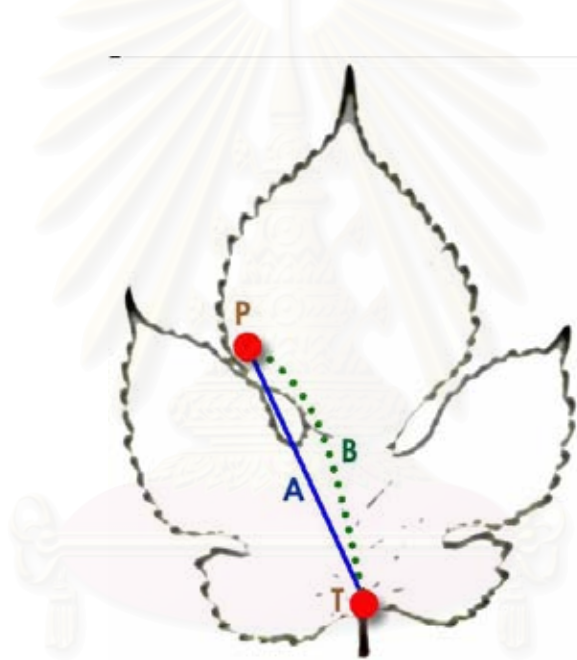
7.1.2 ระบบขนส่งอนุภาค

ระบบขนส่งอนุภาคเป็นแนวคิดใหม่ของระบบที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองโครงสร้างพืช ได้แนวความคิดมาจากการสังเคราะห์แสงของพืชในโครงสร้างของใบไม้โดยยึดถือคุณสมบัติสำคัญอย่างหนึ่งของพืชนั่นคือการขนส่งพลังงาน ได้ปรับปรุงให้สร้างโครงสร้างของใบไม้และพืชโดยการปรับเปลี่ยนระบบให้อยู่ในรูปแบบสองมิติและสามมิติ ประโยชน์ของระบบขนส่งอนุภาคมีดังนี้

- **รวดเร็ว** - ขั้นตอนวิธีนี้ทำงานได้รวดเร็ว
- **ใช้พารามิเตอร์ควบคุมจำนวนน้อย** - มีพารามิเตอร์ควบคุมจำนวนน้อย ไม่ซับซ้อน สำหรับผู้ไม่ชำนาญสามารถใช้พารามิเตอร์ปกติ (default) ได้ ไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมก่อนการสร้างแบบจำลอง
- **ควบคุมรูปร่างภายนอกได้ตามต้องการ** - สร้างโครงสร้างจากรูปร่างภายนอกได้ตามต้องการ ทำให้คาดเดาผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นได้ สนับสนุนการตัดแต่งรูปทรง (topiary)
- **ตอบสนองต่อสภาพแวดล้อม** - สามารถใช้สร้างแบบจำลองที่ได้รับผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมเช่นปริมาณแสงได้
- **มีความสมจริง** - ผลลัพธ์ของโครงสร้างพืชที่ได้จากขั้นตอนวิธีนี้มีความใกล้เคียงกับโครงสร้างของพืช
- **ทำงานอัตโนมัติ** - ไม่ต้องการใช้คนช่วยสร้างกฎควบคุม เช่นใน L-systems
- **การพัฒนาโปรแกรมไม่ซับซ้อน** - เขียนโปรแกรมง่ายกว่า ไม่ต้องสร้าง parser
- **สร้างแบบจำลองที่เหมือนกันหรือคล้ายกันได้** - สามารถกำหนดให้สร้างแบบจำลองที่มีลักษณะเหมือนเดิม หรือมีลักษณะสุ่มที่ใกล้เคียงได้
- **ปรับรายละเอียดของแบบจำลองได้** - การสร้างแบบจำลองมีความยืดหยุ่น สามารถกำหนดให้สร้างด้วยความละเอียดน้อยหรือมากได้
- **ประยุกต์ใช้สร้างแบบจำลองอื่น ๆ ได้** - สามารถประยุกต์สร้างแบบจำลองได้หลายแบบ เช่น ใบไม้ สีและลวดลายของใบไม้ โครงสร้างต้นไม้ ระบบราก เป็นต้น

ข้อจำกัดของระบบปัจจุบันมีดังนี้

- **ระบบทำงานภายในขอบเขตเว้าออก (Convex shape)** - เกิดขึ้นในกรณีของใบไม้จึงไม่สามารถสร้างโครงสร้างของใบไม้บางประเภทได้ ทำให้ระบบอนุภาคนั้นไม่สามารถใช้ได้กับใบไม้ในทุกรูปแบบ เนื่องจากพบว่ามีใบไม้บางรูปแบบนั้นมีรูปร่างเว้าเข้า และอนุภาคอาจจะเคลื่อนที่ออกนอกขอบใบไม้ได้ ตัวอย่างในรูปที่ 127 เมื่อกำหนดให้อนุภาคอยู่ที่จุด P และเป้าหมายที่จุด T เส้นตรง A แสดงเส้นตรงที่สั้นที่สุดสำหรับระยะทางระหว่างจุด P และจุด T แต่เส้นตรง A นั้นมีบางส่วนหลุดออกนอกขอบใบไม้ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ออกนอกใบไม้ได้ซึ่งจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่ถูกต้อง ในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้แก้ปัญหาตรงจุดนี้สำหรับการแก้ไขปัญหาดังกล่าวควรใช้เส้นโค้งประ B แทน **การแก้ไขที่อาจเป็นไปได้ในอนาคต** 1. ค้นหาเส้นทางที่ใกล้ที่สุดที่ยังอยู่ภายในขอบเขตของพื้นที่ 2. แบบจำลองการชนกัน (collision) เพื่อป้องกันไม่ให้ particle เคลื่อนที่ออกนอกขอบใบ



รูปที่ 127 ปัญหาเส้นตรงที่สั้นที่สุดสำหรับจุด P และ T ในใบไม้จากต้น Paper Mulberry (*Broussonetia papyrifera*)

- **ไม่กำหนดรูปแบบการเชื่อมต่อ** - การเชื่อมต่อเป็นไปอย่างอัตโนมัติ ทำให้ไม่ครอบคลุมรูปแบบการเชื่อมต่อของโครงสร้างของใบไม้บางประเภท **การแก้ไขที่อาจเป็นไปได้ในอนาคต** 1. กำหนดเงื่อนไขในการเชื่อมต่อ 2. กำหนดประเภทของอนุภาคต่างกัน 3. กำหนดขีดของแรงดึงดูดให้กับอนุภาค
- **ไม่มีการเจริญเติบโต** - การสร้างแบบจำลองได้ผลทันที ไม่สนับสนุนแบบจำลองสำหรับการเจริญเติบโต ในกรณีของใบไม้ที่เส้นใบของใบไม้ขนาดเล็กมีความเหมือนกับเส้นใบของใบไม้ขนาดใหญ่ การเจริญเติบโตจึงเน้นไปยังแบบจำลองของต้นไม้และระบบราก **การแก้ไขที่อาจเป็นไปได้ในอนาคต** 1. ใช้ลำดับการเชื่อมต่อของอนุภาคเป็นลำดับที่เชื่อมต่อ

ภายหลัง เช่น เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่จากใบไม้ ส่วนลำดับการสร้างกิ่งไม้เป็นส่วนที่เกิดขึ้นก่อนและส่วนลำต้นส่วนโคนเป็นส่วนที่เกิดขึ้นภายหลัง ดังนั้นการเจริญเติบโตที่เกิดขึ้นก่อนคือส่วนโคนต้นที่มีลำดับการสร้างภายหลัง จากนั้นจึงค่อยแสดงผลกิ่งไม้ที่สร้างเป็นลำดับแรกๆ 2.กำหนดขอบเขตของเพิ่มภายหลังจากสร้างแบบจำลองขั้นต้นแล้ว 3.กำหนดพื้นที่ให้อยู่ในรูปของพื้นที่และเวลา (time-space)

7.2 สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีใหม่สำหรับสร้างแบบจำลองของพืช โดยเฉพาะแบบจำลองของเส้นใบ และแบบจำลองของต้นไม้ ขั้นตอนวิธีดังกล่าวได้รับแรงบันดาลใจจากธรรมชาติและกฎการขนส่งพลังงานที่เป็นองค์ประกอบสำคัญภายในระบบขนส่งอนุภาค โครงสร้างของแบบจำลองสร้างจากการเคลื่อนที่ของ อนุภาคด้วยขั้นตอนวิธีนี้สามารถสร้างแบบจำลองพืชภายในรูปร่างที่กำหนดได้โดยง่าย ใช้พารามิเตอร์จำนวนน้อย และได้โครงสร้างที่มีความใกล้เคียงกับโครงสร้างของธรรมชาติอีกด้วย

7.3 ข้อเสนอแนะและปัญหาทั่วไป

แบบจำลองของโครงสร้างดังกล่าวมีผลมาจากการคำนึงถึงการขนส่งพลังงานด้วยเส้นทางที่ประสิทธิภาพ โครงสร้างนี้พบได้ในเกือบทุกอย่างที่สร้างโดยฝีมือของธรรมชาติ เช่น ใบไม้ ต้นไม้ ยังรวมไปถึง ลวดลายของใบไม้ กลีบดอกไม้ ไม่เพียงแต่พืชเท่านั้นยังอาจรวมถึงโครงสร้างของสัตว์ได้ด้วย เช่น ปีกผีเสื้อ (รูปที่ 128) เป็นต้น แบบจำลองนี้น่าจะใช้ประโยชน์ในการสร้างโครงสร้างอื่นๆ ได้อีกด้วย มีคำกล่าวที่ว่าทุกๆ สิ่งอธิบายได้ด้วยคณิตศาสตร์ โครงสร้างที่ซับซ้อนเหล่านี้ โดยแท้จริงแล้วสร้างได้ด้วยกฎง่ายๆ ที่ไม่ซับซ้อน บนพื้นฐานของการมีผลกระทบซึ่งกันและกันของหน่วยย่อยแต่ละส่วนที่ใกล้เคียงกัน



“Chestnut Tiger, *Parantica sita*, ผีเสื้อหนอนใบรักตาลแดง” (ขวา).

รูปที่ 128 แบบจำลองของผีเสื้อสร้างจากระบบขนส่งอนุภาค (ซ้ายและกลาง) ภาพผีเสื้อจริง (ขวา)

ทำยนี้ ในหนังสือ *Mathematical Biology* ของ J. D. Murray (1989) กล่าวถึงรูปแบบของคลื่นในแบบจำลองของธรรมชาติ การเปลี่ยนแปลงของคลื่นสร้างปรากฏการณ์และลวดลายต่างๆ ในธรรมชาติได้อย่างน่าสนใจ ส่วนงานวิจัยนี้ได้ใช้อุณหภูมิสร้างแบบจำลองทางธรรมชาติ ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสังเกตว่าแบบจำลองของธรรมชาตินั้นสามารถแทนด้วยแบบจำลองของปรากฏการณ์ได้ทั้งสองแบบคือคลื่นและอนุภาค

รายการอ้างอิง

1. A. R. Smith, "Plants, Fractals, and Formal Languages", Proceedings of SIGGRAPH'84, in Computer Graphics 18 (3), ACM SIGGRAPH, 1984, pp. 1-10.
2. A. J. Coomers, Trees, London, Dorling Kindersley Limited, 2000.
3. A. Watt, 3D Computer Graphics, 3rd Ed. Addison-Wesley, 2000.
4. A. Watt and M. Watt, Advanced Animation and Rendering Techniques – Theory and Practice, Addison-Wesley, 1992.
5. C. Lursinsap, P. Sophatsathit, S. Siripant and Y. Shinagawa, "Simulation of Leaf Growth Based On A Rewriting System: A Unified Leaf Model", Advance Virtual and Intelligence Computing Research Center (AVIC), Chulalongkorn University, Technical Report No. 01.01.2000.
6. C. Grey-Wilson, Wild Flowers, London, Dorling Kindersley Limited, 1994.
7. D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine learning, Addison-Wesley, Redwood City, 1989.
8. D. R. Fowler, H. Meinhardt and P. Prusinkiewicz, "Modeling Seashells", Proceeding of SIGGRAPH'92, 26(2), 1992, ACM SIGGRAPH, New York, pp. 379-387.
9. D. R. Fowler, J. Hanan and P. Prusinkiewicz, "Modelling spiral Phyllotaxis", computer & graphics, 13(3), 1989, pp. 291-296.
10. D. R. Fowler, P. Prusinkiewicz, and J. Battjes. A Collision-based Model of Spiral Phyllotaxis. Proceedings of SIGGRAPH '92 (Chicago, Illinois, July 26-31, 1992), In Computer Graphics, 26, 2, (July 1992), ACM SIGGRAPH, New York, pp. 361-368.
11. D. Wang, D. J. Kerbyson, G. J. King and G. R. Nudd, "Realistic image synthesis of plant structures for genetic analysis", Journal of Image and Vision Computing, 19, 2001, pp. 517-522.
12. G. Kokai, R. Vanyi and Z. Toth, "Parametric L-systems Description of the Retina with Combined Evolutionary Operators", Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference [GECCO'99], Vol. 2, 1999, pp. 1588-1595.
13. G. Kokai, Z. Toth and R. Vanyi, "Evolving Artificial Trees Described by Parametric L-systems", IEEE Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering, 3, 1999, pp. 1722-1727.
14. H. Abelson and A.A. diSessa, Turtle geometry, M.I.T. Press, Cambridge, 1982.

15. I. Shlyakhter, M. Rozenoer, J. Dorsey and S. Teller, "Reconstructing 3D Tree Models from Instrumented Photographs", IEEE Computer Graphics and Applications, May/June 2001.
16. J. Bloomenthal, "Modeling the Mighty Maple", Processings of SIGGRAPH'85 (San Francisco, California, July 22-26, 1985), In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, 1985, pp. 305-311.
17. J. D. Murray, Mathematical Biology, Springer-Verlag, New York, 1989.
18. J. Weber and J. Penn, "Creation and Rendering of Realistic Trees", ACM SIGGRAPH 1995.
19. K. Kaino, "Geometry of Folded Pattern of Veins and Origami Model of Digitate Leaves", Forma, 9, 1994, pp.253-257.
20. K. Kaino, K.Yajima and N.Chiba, "Origami Modeling Method of Leaves of Plants and CG Image Generation of Flower Arrangement", Proceedings of ICPADS 2000 Workshops, pp.207-212.
21. Katherine Esau, Plant Anatomy, 2nd ed, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1965.
22. M. Aono and T.Kunii, "Botanical Tree Image Generation", IEEE Computer Graphics and Applications, May 1984, 4(5), pp. 10-34.
23. M. Chover, R.Vivo, R. Quiros and X. LLuch, "Texture, Displacement and Immersion: A Model for Tree Rendering", The Third Conference in Central Europe on Computer Graphics and Viduslization 95 (WSCG95), 1995.
24. M. Hammel, P. Prusinkiewicz, W. Remphery and C. Davidson, "Simulating the development of Fraxinus pennsylvanica shoots using L-systems", Proc. of the sixth Western Computer Graphics Symposium, 1995, pp. 49-58.
25. M. S. Hammel, P. Prusinkiewicz and B. Wyvill, "Modeling compound leaves using implicit contours", Proceedings of Computer Graphics International '92 (Tokyo, Japan, 22-26 June 1992)., In Tosiyasu L. Kunii, editor, Visual computing: integrating computer graphics with computer vision, Springer-Verlag, 1992. pp. 119-212.
26. M. S. Schneider, A Beginner's Guide to Constructing the Universe, HarperPerennial, NewYork, 1995.
27. N. Chiba, K. Ohshida, K. Muraoka and N. Saito, "Visual simulation of Leaf Arrangement and Autumn Colours", The Journal of Visualization and Computer Animation, 7, 1996, pp. 79-93.
28. N. Chiba, K. Ohshida, K. Muraoka, M. Miura and N. Saito, "A growth model having the abilities of growth-regulations for simulating visual nature of botanical trees", Computer & Graphics, 18 (4), 1994, pp. 496-479.

29. N. Chiba et al., "Image Generation Method for Swaying Branches by Wind", In Journal of IEEEJ, 27(5), 1993, pp. 475-483.
30. N. Chiba, S. Ohkawa, K. Muraoka and M. Miura, "Visual simulation of botanical trees based on virtual heliotropism and dormancy break", The Journal of Visualization and Computer Animation, 5(1), 1994, pp. 3-15.
31. N. Greene, "Voxel Space Automata: Modeling with Stochastic Growth Processes in Voxel Space", Computer Graphics, 23 (3), 1989, pp. 175-184.
32. P. de Reffye, C. Edelin, J Francon, M. Jaeger and C. Puech, "Plant Models faithful to Botanical Structure and Development", Proceeding of SIGGRAPH'88 (Atlanta, Georgia, August 1-5, 1988), In Computer Graphics Proceedings, 22 (4), ACM SIGGRAPH, 1988, pp 151-158.
33. P. Prusinkiewicz and J. Hanan, "Visualization of botanical structures and process using parametric L-system", Scientific Visualization and Graphics Simulations, ed. D.Thalmann, 1990, pp. 183-201.
34. P. Prusinkiewicz and A. Lindenmayer, The algorithmic beauty of plants, Springer-Verlag, New York, 1990. With J. S. Hanan, F. D. Fracchia, D. R. Fowler, M. J. M. de Boer and L. Mercer.
35. P. Prusinkiewicz and L. Kari, "Subapical bracketed L-systems", Grammars and their Application to Computer Science, vol. 1073, Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, Berlin, 1996, pp. 550-564.
36. P. Prusinkiewicz, "Modeling and Visualization of Biological Structures", Proceeding of Graphics Interface '93, 1993. pp. 128-137., Toronto, Ontario, 19-21 May 1993.
37. P. Prusinkiewicz, A. Lindenmayer and J.Hanan, "Developmental models of herbaceous plants for computer imagery purposes", Computer Graphics, 22 (4), 1988, pp. 141-150.
38. P. Prusinkiewicz, L. Mundermann, R. Karwowski, B. Lane, "The use of positional information in the modeling of plants", ACM SIGGRAPH, 2001, pp.289-300.
39. P. Prusinkiewicz, M. Hammel and E. Mjolsness, "Animation of plant development", Proceedings of SIGGRAPH 93 (Anaheim, California, August 1-6, 1993), In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, 1993, SIGGRAPH, pp. 351-360
40. P. Prusinkiewicz, M. Hammel, J. Hanan and R. Mech. "L-systems: from the theory to visual models of plants". In M. T. Michalewicz, editor, Proceedings of the 2nd CSIRO Symposium on Computational Challenges in Life Sciences. CSIRO Publishing, 1996.

41. P. Prusinkiewicz, M. Hammel, J. Hanan and R. Mech. "Visual models of plant development". In G. Rozenberg and A. Salomaa, editors, Handbook of formal languages. Springer-Verlag, 1996.
42. P. Prusinkiewicz, M. Hammel, R. Mech and J. Hanan. "The Artificial Life of Plants". Artificial Life for graphics, animation and virtual reality, vol.7 SIGGRAPH'95 Course Note, ACM SIGGRAPH , 1995. pp. 1-38.
43. P. Prusinkiewicz, M. James and R. Mech, "Synthetic topiary", Proceedings of SIGGRAPH 94 (Orlando, Florida, July 24-29, 1994). In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, 1994, SIGGRAPH, pp. 351-358.
44. P. Prusinkiewicz, R. Karwowski, R. Mech and J. Hanan. "L-studio/cpfg: A Software System for Modeling Plants", 2000. Lecture Notes in Computer Science, 1779, Springer-Verlag, Berlin, 2000, pp. 457-464.
45. R. Mech and P. Prusinkiewicz, "Visual Model of Plants Interacting with Their Environment", Proceedings of SIGGRAPH 96 (New Orleans, Louisiana, August 4-9, 1996). In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, 1996, ACM SIGGRAPH, pp. 397-410.
46. R. V. Jean, Phyllotaxis, A Systemic Study in Plant Morphogenesis, Cambridge University Press, New York, 1994.
47. S. Chuai-aree, S. Siripant and C. Lursinsap, "Animating Plant Growth in L-systems by Parametric Functional Symbols", Proceedings of The First International Conference on Intelligent Technologies (InTech'2000), 2000, pp. 135-143., Held in Bangkok, Thailand, 13-15 Dec 2000.
48. Smithsonian Institution, Manual of Leaf Architecture - morphological description and categorization of dicotyledonous and net-veined monocotyledonous angiosperms, Washington, D.C., Leaf Architecture Working Group, 1999.
49. T. Sakaguchi and J. Ohya, "Modeling and Animation of Botanical Trees for Interactive Virtual Environments", ACM, 1999.
50. W. T. Reeves, "Approximate and probabilistic algorithms for Shading and Rendering Structured Particle Systems", Proceeding of SIGGRAPH'85 (San Francisco, California, July 22-26, 1985), In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, 19(3) , ACM SIGGRAPH, 1985. pp. 313-322.
51. W. T. Reeves, "Particle Systems - A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Object", ACM Transactions on Graphics, 2(2), April 1983, pp. 91-108.
52. W. T. Keeton, Elements of Biological Science, New York, Norton & Company Inc., 1969.

53. X. B. Viennot, G. Eyrools and N. Janey, "Combinatorial Analysis of Ramified Patterns and Computer Imagery of Tree", Computer Graphics, 23 (3), 1989, pp. 31-40.
54. Y. Rodkaew, S. Siripant, C. Lursinsap and P. Chongstitvatana "An algorithm for generating vein images for realistic modeling of a leaf", Computational Mathematics and Modeling, CMM2002, 2002.
55. Y. Rodkaew, S. Siripant, C. Lursinsap and P. Chongstitvatana, "Generate Leaf Shapes using L-systems and Genetic Algorithms", Proceedings of The First International Conference on Intelligent Technologies (InTech'2000), Dec 2000, pp. 154-158. Bangkok, Thailand, 13-15 Dec 2000.
56. Y. Rodkaew, S. Siripant, C. Lursinsap, P. Chongstitvatana, T. Fujimoto and N.Chiba "Modeling Leaf Shapes using L-systems and Genetic Algorithms", NICOGRAPH2002, 2002.
57. Y. Rodkaew, S. Chuai-aree, S. Siripant, C. Lursinsap and P. Chongstitvatana "Animating Plant Growth in L-systems By Parametric Functional Symbols", Journal of International Journal of Intelligent Systems, Wiley, New York, 19(1/2), 2004, 9-23.
58. จารุพันธ์ ทองแถม, ม.ล., ชีวิตพืชบนดาวเคราะห์โลก Plant's Life of the Planet Earth, กรุงเทพฯ, อัมรินทร์พรินต์ติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง, 2545.
59. ไชมอน การ์ดเนอร์, พินดา สิทธิสุนทร, วิไลวรรณ อนุสารสุนทร, ต้นไม้เมืองเหนือ (คู่มือศึกษาพรรณไม้ยืนต้นในป่าภาคเหนือ ประเทศไทย), โครงการจัดพิมพ์คบไฟ, กรุงเทพฯ, 2543.
60. ไพฑูรย์ สุขศรีงาม, พฤกษศาสตร์:โครงสร้างของพืช, มหาสารคาม, โรงพิมพ์ปริดาออฟเซท, 2527.
61. วันเพ็ญ ภูติจันทร์, พฤกษศาสตร์, สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2540.
62. ราชบัณฑิตยสถาน, ศัพท์พฤกษศาสตร์ อังกฤษ-ไทย ฉบับราชบัณฑิตยสถาน, กรุงเทพฯ, 2541
63. สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล, คณิตศาสตร์ (Discrete Mathematics), ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

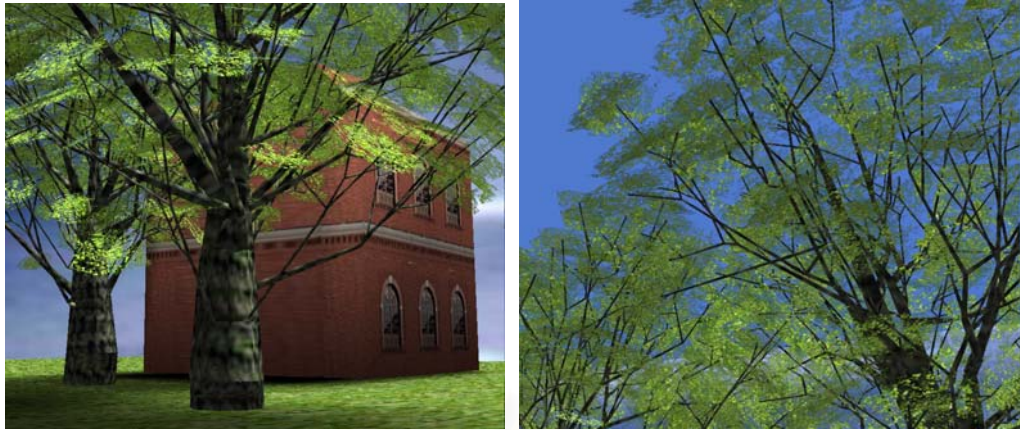
ก. ภาพสร้างจากระบบขนส่งอนุภาค



รูปที่ 129 ภาพสร้างจากระบบขนส่งอนุภาค จำลองฤดูกาลต่าง ๆ ด้วยการเปลี่ยนภาพพื้นผิวโดยใช้แบบจำลองต้นไม้ ต้นเดียวกัน



รูปที่ 130 ภาพสร้างจากระบบขนส่งอนุภาค แนวต้นไม้จากมุมมองด้านข้าง (ซ้าย) ต้นไม้สร้างจากรูปทรงสี่เหลี่ยม สามอันประกอบกัน (ขวา)



รูปที่ 131 ภาพสร้างจากระบบขนส่งอนุภาค แสดงโครงสร้างของลำต้นในมุมมองต่าง ๆ กัน



รูปที่ 132 แบบจำลองต้นไม้และใบไม้ ใบไม้และต้นไม้ที่ใช้ระบบขนส่งอนุภาค



รูปที่ 133 แบบจำลองต้นไม้และใบไม้ แสดงโครงสร้างของลำต้นในมุมมองต่าง ๆ กัน



รูปที่ 134 แบบจำลองใบไม้รูปร่างต่าง ๆ ใบสร้างจากเส้นโค้ง spline

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายยอดธง รอดแก้ว เกิดวันที่ 29 มกราคม พ.ศ. 2518 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย ในปีการศึกษา 2538 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อ พ.ศ. 2540 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อ พ.ศ. 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย