

การสร้างภาพเคลื่อนไหวเมฆในสามมิติโดยใช้คอมพิวเตอร์กราฟิกส์แบบแก๊สแลตทิซ



นางสาวณัฐวีร์ โคสุวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THREE DIMENSIONAL CLOUD ANIMATION USING LATTICE GAS AUTOMATA



Miss Nattawee Kowsuwan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Computer Engineering

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสร้างภาพเคลื่อนไหวเมฆในสามมิติโดยใช้ซอฟต์แวร์
แบบแก๊สแลตทิซ

โดย

นางสาวณัฐวีร์ ไควสุวรรณ

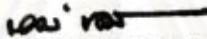
สาขาวิชา

วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

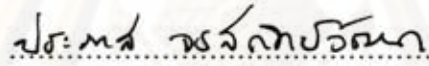
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

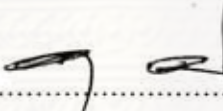
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิษณุ คนองชัยยศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิษณุ คนองชัยยศ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.วิรัช นัตถรงค์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.ชาคริต วัชรโรภาส)

ศูนย์วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ณัฐวีร์ ไควสุวรรณ : การสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆในสามมิติโดยใช้โอโตมาตาแบบ แก๊สแลตทิซ. (THREE DIMENSIONAL CLOUD ANIMATION USING LATTICE GAS AUTOMATA) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. พิษณุ คนองชัยยศ, 101 หน้า.

การแสดงภาพเคลื่อนไหวของเมฆในสามมิติจากภาพถ่ายดาวเทียมสองมิติ มีความสำคัญอย่างมากต่อการศึกษาสภาพภูมิอากาศของโลก เนื่องจากภาพถ่ายดาวเทียมเป็น ภาพที่บันทึกข้อมูลสภาพภูมิอากาศจริงในแต่ละช่วงเวลา และการนำภาพถ่ายดาวเทียมสองมิติ มาแสดงผลเป็นภาพเมฆสามมิติด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์กราฟิกส์ จะช่วยเพิ่มมุมมองของ ภาพให้มากยิ่งขึ้น ทั้งนี้มีหลายแอปพลิเคชันที่ต้องการแสดงภาพเมฆในสามมิติจากภาพถ่าย ดาวเทียม อาทิเช่น ในการสร้างมโนภาพของภูมิอากาศ, การรายงานสภาพอากาศ และใน โปรแกรมจำลองการบิน เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามภาพถ่ายดาวเทียมมักถูกบันทึกในช่วงเวลาที่ ต่างกัน จึงทำให้การแสดงภาพเคลื่อนไหวของเมฆขาดความต่อเนื่อง ฉะนั้นจึงนิยมสร้างเฟรม ของภาพถ่ายดาวเทียมหรือภาพสามมิติส่วนที่ไม่มีข้อมูลขึ้นมาใหม่เพื่อช่วยให้ภาพเคลื่อนไหว ของเมฆมีความต่อเนื่อง

ขั้นตอนแรกของงานวิจัยจะเป็นส่วนการสร้างข้อมูลสามมิติของเมฆจากภาพถ่าย ดาวเทียมต้นทางและภาพถ่ายดาวเทียมปลายทาง โดยใช้วิธีทางเซลล์ลาร์อโตมาตาที่ พัฒนาขึ้นมาใหม่สำหรับจำลองภาพสามมิติของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียม จากนั้นจึงนำข้อมูล สามมิติของภาพถ่ายดาวเทียมทั้งสองภาพ มาสร้างเป็นภาพเคลื่อนไหวของเมฆด้วยการ ประยุกต์หลักการของวิธีอโตมาตาแบบแก๊สแลตทิซซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้สำหรับสร้างพลวัต ให้กับอนุภาคของไหลภายใต้การเคลื่อนที่แบบกิริค และนำสถานะเวกเตอร์ความเร็วของเพื่อน บ้านมาเป็นเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงทิศทาง สำหรับการทดสอบวิธีของงานวิจัย ผู้วิจัยได้ พัฒนาซอฟต์แวร์ที่ใช้ประมวลผลภาพสามมิติของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียม เพื่อทดสอบกับ ภาพถ่ายดาวเทียมที่มีเมฆหลาย ๆ แบบ ซึ่งวิธีการของงานวิจัย มีความรวดเร็วในการ ประมวลผล และสามารถแสดงภาพเคลื่อนไหวของเมฆในสามมิติได้อย่างน่าพอใจเมื่อเทียบกับ วิธีการอื่น

ภาควิชา.....วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อนิสิต..... *ณัฐวีร์ ไควสุวรรณ*
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... *ท. อ.*
 ปีการศึกษา 2552.....

4970770021 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

Keywords : SATELLITE IMAGERY / CLOUD VISUALIZATION / MODELING /
3D CLOUD ANIMATION / CELLULAR AUTOMATA / LATTICE GAS AUTOMATA

NATTAWEE KOWSUWAN : THREE DIMENSIONAL CLOUD ANIMATION
USING LATTICE GAS AUTOMATA. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.
PIZZANU KANONGCHAIYOS Ph.D., 101 pp.

The visualization and animation of 3D cloud from satellite images are important for understanding the climate change around our atmosphere. Animation cloud in 3D using real world data (like satellite cloud image) is suitable for many applications such as 3D weather visualization, weather report, and flight simulation. The techniques to implement these applications are through computer graphics. It is more applicable to visualize cloud from many perspectives not only as appeared in top-view image which is provided from the satellite image. However the sequences of satellite images are usually disconnected from each others from different time, the result of animation might not be smooth. Therefore the interpolating new frames of cloud are utilized to output smoothed image cloud sequences.

In the first step, satellite images were separated into several layers by classifying image's pixel intensities, and then the rule based on Cellular Automata (CA) was be used for generating 3D cloud. After that, the interpolation method referring to the rule of Lattice Gas Cellular Automata (LGCA) - the fluid simulation method which directs every vector on a grid by the condition of neighboring node - was developed to animate 3D cloud from the time t_1 to time t_2 . An application is developed for testing these methods with several satellite images, the result of 3D cloud is fast and has good appearance compared with other techniques.

Department: Computer Engineering Student's signature.....
Field of study: Computer Engineering Advisor's signature.....
Academic year: 2009

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิษณุ คนองชัยยศ ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งคอยอบรม ชี้แนะ และขัดเกลา ทั้งในกระบวนการวิจัยและกระบวนการคิดแบบ
นักวิจัย อันมีประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และต่อตัวข้าพเจ้าเป็นอย่างยิ่ง ขอขอบพระคุณ
คณาจารย์ผู้สอนวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา,
ดร.วิรัช ฉัตรตรงค์ และ ดร.ชาคริต วัชรโรภาส ที่ได้ให้คำแนะนำอันมีคุณค่าและมีประโยชน์ต่อ
การพัฒนาคุณภาพของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คิตาโมโตะ อะซาโนบุ แห่งสถาบัน NII
(National Institute of Informatics) ณ กรุงโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ที่มอบความรู้ด้านภาพถ่าย
ดาวเทียม และความช่วยเหลือต่าง ๆ ระหว่างการพำนักที่ประเทศญี่ปุ่นของข้าพเจ้า รวมถึงได้
มอบภาพถ่ายดาวเทียมบางส่วนสำหรับใช้ในงานวิจัย และขอขอบพระคุณศาสตราจารย์
ดร.สุรดิศ โหละสุต ที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์และความรู้ของท่านให้แก่ข้าพเจ้า ซึ่งส่วนหนึ่งนั้น
ก็ได้กลายเป็นวิธีวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่คอยดูแลสนับสนุน
และเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าไม่ย่อท้อ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ทุกคน ทั้งที่อยู่ในห้อง
วิจัยคอมพิวเตอร์กราฟิกส์และภายนอกห้องวิจัยที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แลกเปลี่ยนความรู้ และ
มอบความปรารถนาดีให้แก่กันตลอดมา รวมทั้งขอขอบคุณกัลยาณมิตรทุกท่านที่มีบทบาท
สำคัญระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ และภาควิชา
วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ที่อำนวยความสะดวกตลอดการวิจัยจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

และท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าขอกราบบูชาคุณพระรัตนตรัย และองค์พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ซึ่งมีคุณูปการอันอเนกอนันต์ต่อข้าพเจ้าอย่างไม่อาจประมาณได้.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	4
1.6 วิธีดำเนินงานวิจัย	5
1.7 ผลงานตีพิมพ์จากงานวิจัย	5
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ทฤษฎีเมฆและภาพถ่ายดาวเทียม	7
2.1.1 เมฆ (Cloud)	7
2.1.2 ภาพถ่ายดาวเทียม (Satellite Imagery)	7
2.1.3 การสร้างลำดับต่อเนื่องของภาพถ่ายดาวเทียม	11
2.1.4 ภาพถ่ายดาวเทียมของเมฆที่นำมาใช้ในงานวิจัย	11
2.2 การสร้างภาพเคลื่อนไหวในทางคอมพิวเตอร์กราฟิกส์	12
2.3 วิธีการทางเซลลูลาร์ออโตมาตา (Cellular automata: CA)	12
2.3.1 ทฤษฎีบทเซลลูลาร์ออโตมาตา	12
2.3.2 แบบจำลองเซลลูลาร์ออโตมาตาของของไหล (Lattice Gas Automata)	16
2.3.3 วิธีการเซลลูลาร์ออโตมาตาเพื่อจำลองการเติบโตของหมู่เมฆ	25
2.3.4 วิธีเซลลูลาร์ออโตมาตาสำหรับการหลอมภาพปริมาตรสามมิติ	27
3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29

3.1.1 การประมวลผลภาพถ่ายดาวเทียมแบบใกล้เคียงเวลาจริง โดยใช้การคำนวณแบบเมตาในภาษา C++ (Near-real-time Satellite Image Processing: Metacomputing in C++) [22] ปี 1996.....	30
3.1.1 การสร้างแบบจำลองเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียมโดยใช้เมตาบอล (Modeling of Clouds from Satellite Images Using Metaballs) โดย โด-บาชิ และคณะ [1] ปี 1998-1999	31
3.1.2 งานวิจัยการสร้างภาพเคลื่อนไหวของหมุ่เมฆโดยใช้เซลลูลาร์ออโตมาตา (Animation of Clouds Using Cellular Automaton) โดย โดบาชิ และคณะ [23] ปี 1999.....	33
3.1.3 วิธีการที่มีประสิทธิภาพสำหรับการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆแบบเสมือนจริง (A Simple, Efficient Method for Realistic Animation of Clouds) โดย โดบาชิและคณะ [24] ปี 2000	34
3.1.4 งานสร้างเมฆและพายุใน 3 มิติ จากภาพถ่ายดาวเทียม 2 มิติ (3D Cloud and Storm Reconstruction from Satellite Image) โดยสมพรช่วยอารีย์และคณะ [25] ปี 2003 และ 2006	36
3.1.5 โปรแกรมแสดงโครงสร้างสามมิติของเมฆในชั้นบรรยากาศ โดยใช้การประมวลและสร้างมโนภาพ (3-D Atmospheric Cloud Structures: Processing and Visualization tools) โดย Alvarez L และคณะ [27] ปี 2006	38
3.1.6 เทคโนโลยีแอปพลิเคชันสำหรับภาพถ่ายดาวเทียมสามมิติของเมฆในโปรแกรมจำลองเวอร์ชวลเรียลลิตี้ (The Application of the Technology of 3D Satellite Cloud Imaging in Virtual Reality Simulation) [28] ปี 2007	39
4. วิธีดำเนินการวิจัย	41
4.1 การจำลองเมฆในสามมิติ.....	42
4.1.1 วิธีการจำแนกชั้นเมฆของภาพถ่ายดาวเทียม.....	42
4.1.2 วิธีทางเซลลูลาร์ออโตมาตาเพื่อสร้างข้อมูลสามมิติของเมฆ.....	45
4.2 การสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆในสามมิติ.....	47
4.2.1 การปรับกริดเพื่อใช้ในงานวิจัย.....	48
4.2.2 การหาทิศทางเคลื่อนที่เริ่มต้นในการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆ.....	50
4.2.3 การเคลื่อนตัวของเวกเตอร์แลตทิซ.....	53
4.2.4 การตรวจสอบการชนกัน.....	55
4.2.5 การคำนวณค่าสีของเมฆจากบัพในแลตทิซ	57
4.2.6 ตารางที่นำมาประกอบการพิจารณาเมื่อมีการเคลื่อนที่.....	57

4.2.7 ลำดับขั้นตอนการเคลื่อนที่ของเมฆในแต่ละชั้นเวลา.....	60
5. การทดลองและวิเคราะห์ผล	61
5.1 ผลการจำลองเมฆในระบบสามมิติ	61
5.1.1 การแบ่งส่วนภาพถ่ายดาวเทียม	61
5.1.2 การกำหนดชั้นเมฆของเมฆในสามมิติ	64
5.1.3 ตัวอย่างชั้นย่อยของเมฆที่ถูกสร้างใหม่จากวิธีการในงานวิจัยฯ.....	64
5.1.4 ผลการจำลองภาพสามมิติของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียม	65
5.1.5 ตัวแปรที่เหมาะสมในสมการ	68
5.1.6 ความเร็วในการประมวลผล.....	69
5.1.7 ข้อจำกัดของวิธีการ	70
5.1.8 วิเคราะห์ประสิทธิภาพและเปรียบเทียบผล	72
5.2 ผลการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆ	72
5.2.1 ผลการทดลองสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆ.....	72
5.2.2 ความเร็วในการประมวลผล.....	79
5.2.3 ข้อจำกัดของวิธีการ	80
5.2.4 วิเคราะห์ประสิทธิภาพและเปรียบเทียบผล	81
6. สรุปผลการวิจัย	82
6.1 ข้อเสนอแนะ	83
รายการอ้างอิง	84
ภาคผนวก ก	88
ภาคผนวก ข.....	90
ภาคผนวก ค	98
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	101

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงย่านความยาวคลื่นของช่วงแสงประเภทต่างๆ	8
ตารางที่ 2.2 แบบจำลองของไหลในทางการคำนวณที่จำแนกรูปแบบที่แตกต่างกัน [9].....	17
ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างงานสร้างเมฆในทางคอมพิวเตอร์กราฟิกส์จนถึงปี ค.ศ. 2003 [18]	29
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่า I_i , J_i และ K_i สำหรับสมการที่ 4.3 เพื่ออ้างอิงตำแหน่งเพื่อนบ้าน	49
ตารางที่ 4.2 สัญลักษณ์ของตัวดำเนินการที่ใช้ในสมการ 4.6	54
ตารางที่ 4.3 นิยามคุณสมบัติของเซลล์ในกริดสำหรับเป็นค่าในตาราง.....	57
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงการพิจารณาสถานะของ 2 บิตแรกใน ของแต่ละเซลล์.....	58
ตารางที่ 4.5 ตารางคุณสมบัติภายในของเวกเตอร์แลตทิซ.....	59
ตารางที่ 4.6 ตารางการอัปเดตสถานะของเวกเตอร์โดยการเปรียบเทียบกับตารางคุณสมบัติของเซลล์.....	59
ตารางที่ 4.7 ตารางสถานะใหม่ของเวกเตอร์ที่เวลา $t + 1$ โดยเปรียบเทียบกับสถานะของเวกเตอร์ในเวลา t	60
ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างการทดลองหาค่าที่เหมาะสมของ a , b และ $1/h$ เมื่อค่า w ในตำแหน่งเพื่อนบ้านที่อยู่ติดกันเท่ากับ 1.....	68
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบความเร็วในการประมวลผล และคุณภาพของภาพสามมิติของเมฆที่ได้จากการทดลอง	69
ตารางที่ 5.3 ความเร็วในการประมวลผล การสร้างเฟรมของภาพเคลื่อนไหวเมฆในสามมิติจากภาพต้นทางไปยังภาพปลายทาง ที่ได้จากการทดลอง	80

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	ตัวอย่างภาพสามมิติของเมฆที่สร้างจากภาพถ่ายดาวเทียมสองมิติ.....	3
รูปที่ 2.1	ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้	9
รูปที่ 2.2	ภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้ ณ พิกัดเดียวกัน ในแต่ละช่วงเวลา.....	9
รูปที่ 2.3	ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรด.....	10
รูปที่ 2.4	ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรดที่ปรับชัดเมฆบนสุด.....	10
รูปที่ 2.5	ภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรด ณ พิกัดเดียวกัน ในแต่ละช่วงเวลา	10
รูปที่ 2.6	ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมชนิดละอองน้ำ.....	11
รูปที่ 2.7	ลักษณะของเซลล์ลาร์อโตมาตาที่ปรากฏตามธรรมชาติ	12
รูปที่ 2.8	ภาพแสดงเซลล์เพื่อนบ้านของวอนนีอูมานน์.....	13
รูปที่ 2.9	กริดแสดงสถานะของแต่ละเซลล์ในเกมออฟไลฟ์ ณ สเตตที่ต่างกัน.....	14
รูปที่ 2.10	ภาพตัวอย่างของสถานะที่ต่างกัน 8 สถานะของเซลล์ลาร์อโตมาตาตามกฎที่ 254.....	15
รูปที่ 2.11	ภาพแสดงผลของวิธีเซลล์ลาร์อโตมาตา และการเปลี่ยนสถานะตามกฎที่ 254	16
รูปที่ 2.12	ภาพของเซลล์ลาร์อโตมาตาในกฎที่ 90 ซึ่งมีลักษณะการซ้ำรูปแบบในลักษณะเดียวกับแฟร็กทัล	16
รูปที่ 2.14	ภาพของโครงแบบในแบบจำลองเซลล์ลาร์อโตมาตาของของไหล โดยลูกศรที่ปรากฏบนตารางหกเหลี่ยมชี้แทนอนุภาคแบบเต็มหน่วย.....	19
รูปที่ 2.15	กริดของแลตทิซแก๊สแบบ HPP-model ซึ่งแต่ละบัพมีเพื่อนบ้านข้างเคียง 4 บัพ.....	19
รูปที่ 2.16	ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงสถานะของแลตทิซแก๊สแบบ HPP-model.....	20
รูปที่ 2.17	การเปลี่ยนทิศของอนุภาคภายในบัพเมื่อเกิดการชนโดยการสลับตำแหน่งอนุภาคในเส้นแลตทิซ (บน) และแสดงทิศทางในรูปแบบของเวกเตอร์แลตทิซ (ล่าง)	20
รูปที่ 2.18	กริดของแลตทิซแก๊สแบบ FHP-model	21
รูปที่ 2.19	สถานะก่อนการชน และหลังการชนของแลตทิซแก๊สอโตมาตาแบบ FHP [9].....	23
รูปที่ 2.20	ภาพตัวอย่างการแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของแลตทิซแก๊สชนิด FHP-II	23
รูปที่ 2.21	ภาพตัวอย่างการแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของแลตทิซแก๊สชนิด FHP-I	24
รูปที่ 2.22	กริดของแลตทิซแก๊สแบบ FCHC-model	24
รูปที่ 2.23	ตัวอย่างกริดชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในวิธีแลตทิซแก๊สอโตมาตา	25
รูปที่ 2.24	ภาพของกริด 3 มิติ และเมฆแต่ละสถานะ ของวิธีการจำลองการเติบโตแบบเซลล์ลาร์อโตมาตาของเมฆ	26

รูปที่ 2.25	ภาพการเปลี่ยนสถานะภาพการเติบโตของอนุภาคเมฆ และการเคลื่อนตัวตาม แรงลมในแนวนอน.....	26
รูปที่ 2.26	ตัวอย่างสถานะของเมฆเมื่อเวลา $t+1$ จากการใช้กฎการเติบโตของเมฆ	27
รูปที่ 2.27	การหลอมปริมาตรสามมิติโดยใช้ขั้นตอนวิธีคอร์-อินครีเมนต์ จากทรงสี่เหลี่ยม ลูกบาศก์ไปเป็นโครงสร้างเส้นเลือดแดง (บน) และคีระมะมนุษย์ไปเป็นต้นบอน ไซ (ล่าง).....	27
รูปที่ 2.28	การหลอมปริมาตรสามมิติโดยใช้ แบบจำลองการเติบโตของแบคทีเรีย จากทรง สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ไปเป็นโครงสร้างเส้นเลือดแดง (บน) และคีระมะมนุษย์ไปเป็น ต้นบอนไซ (ล่าง).....	28
รูปที่ 3.1	ภาพเมฆสามมิติที่ (ขวา) สร้างจากภาพถ่ายดาวเทียมสองมิติ (ซ้าย)	31
รูปที่ 3.2	ภาพแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียมโดยใช้เมตะบอล	32
รูปที่ 3.3	ภาพสามมิติของเมฆด้วยวิธีการเมตะบอล	32
รูปที่ 3.4	ภาพอธิบายลักษณะของเมตะบอล และภาพวิธีการนำเมตะบอลมาคำนวณการ กระจายตัวแบบต่อเนื่องเพื่อใช้ในการสร้างเมฆ.....	34
รูปที่ 3.5	ตัวอย่างภาพที่เรนเดอร์จากงานวิจัยการสร้างภาพเคลื่อนไหวของหมู่เมฆโดยใช้ วิธีการเซลล์ลาร์อโตมาตา.....	34
รูปที่ 3.6	ภาพถ่ายดาวเทียมจากมหาวิทยาลัยโคจิ ประเทศญี่ปุ่น (ซ้าย) และภาพที่แสดง เมฆและพายุในสามมิติจากภาพถ่ายดาวเทียม (ขวา).....	37
รูปที่ 3.7	ภาพการแสดงผลสามมิติของเมฆด้วยโปรแกรม Virtual Weather 3D (ซ้าย) และโปรแกรมสภาพอากาศสามมิติแบบเสมือน (ขวา)	37
รูปที่ 3.8	หน้าต่างตัวอย่างของโปรแกรมแสดงโครงสร้างสามมิติของเมฆในชั้นบรรยากาศ....	38
รูปที่ 3.9	ผลการแสดงภาพสามมิติของโปรแกรมในแต่ละเฟรมของวิธีการ 3-D Atmospheric Cloud Structures	39
รูปที่ 3.10	ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมที่นำมาใช้ในงานวิจัยในหัวข้อ 3.1.6.....	40
รูปที่ 3.11	ผลการแสดงภาพสามมิติของงานวิจัยหัวข้อ 3.1.6 ที่สร้างจากภาพถ่ายดาวเทียม ในรูปที่ 3.10 ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมที่นำมาใช้ในงานวิจัยในหัวข้อ 3.1.6.....	40
รูปที่ 4.1	แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานในงานวิจัย.....	41
รูปที่ 4.2	แผนภูมิแสดงข้อมูลนำเข้า และส่งออกของการแบ่งชั้นจุดภาพถ่ายดาวเทียม ของเมฆ	43
รูปที่ 4.3	แผนภูมิแสดงการแบ่งชั้นจุดสีของภาพดาวเทียม และกำหนดค่าเริ่มต้น	44
รูปที่ 4.4	แผนผังการทำงานในขั้นตอนการสร้างข้อมูลสามมิติของเมฆ	46
รูปที่ 4.5	บัพเพื่อนบ้านและตำแหน่งที่ใช้ในงานวิจัย โดยในแนวระนาบ (ซ้าย) มีจำนวน 6 บัพ และแนวทแยงสำหรับการเคลื่อนที่ในสามมิติ (ขวา) มีจำนวนรวม 8 บัพ	48

รูปที่ 4.6	ตัวอย่างการปรับบัพ (node) จากกริด ที่มี 8 เพื่อนบ้านในแนวระนาบ ไปสู่กริดแบบ 6 เพื่อนบ้าน.....	49
รูปที่ 4.7	แสดงค่าประจำตำแหน่ง i ของแลตทิซที่ใช้ในงานวิจัย.....	49
รูปที่ 4.8	ภาพแสดงเวกเตอร์ของสภาพอากาศทั่วโลกจากดาวเทียม ทุก ๆ 6 ชั่วโมง.....	50
รูปที่ 4.9	ภาพแสดงการสลายตัวและรวมตัวของเมฆในแต่ละตำแหน่ง (x, y, z) โดยภาพซ้ายเป็นการเปลี่ยนแปลงเมื่อ $p_{t_1}(x, y, z) < p_{t_2}(x, y, z)$ ส่วนภาพขวาเป็นการเปลี่ยนแปลงเมื่อ $p_{t_1}(x, y, z) > p_{t_2}(x, y, z)$ โดยเวลา $t_2 > t_1$	51
รูปที่ 4.10	ภาพตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ของภาพถ่ายดาวเทียมออกเป็นขนาด 3×3 (สองมิติ) เพื่อหาปริมาณรวม โดยภาพซ้ายเป็นตัวอย่างของ $G_{t_1}(m)$ และภาพขวาเป็น $G_{t_2}(m)$	52
รูปที่ 4.11	ภาพลักษณะเวกเตอร์แลตทิซในสองมิติ ที่ได้จากขั้นตอนการหาทิศทางเริ่มต้น.....	53
รูปที่ 4.12	ตำแหน่งของเวกเตอร์เพื่อนบ้าน (ในสองมิติ) ของเวกเตอร์แลตทิซ r	54
รูปที่ 4.13	ภาพแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ r , c_i และ n_i ณ เวลา t (ซ้าย) และ $t + 1$ (ขวา).....	55
รูปที่ 4.14	ภาพรหัสเทียมของการชนในวิธีแลตทิซแก๊สฮอโตมาตาชนิด FHP.....	56
รูปที่ 5.1	ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามมิติสามารถเห็นได้.....	62
รูปที่ 5.2	ตัวอย่างผลการแบ่งส่วนภาพของภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามมิติสามารถเห็นได้.....	62
รูปที่ 5.3	ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรด.....	63
รูปที่ 5.4	ตัวอย่างผลการแบ่งส่วนภาพของภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรด.....	63
รูปที่ 5.5	ตัวอย่างการชั้นของเมฆที่ถูกจำแนก และวางตัวเป็นระดับในปริภูมิสามมิติ.....	64
รูปที่ 5.6	แสดงตัวอย่างชั้นย่อยของเมฆสามมิติ $P(x, y, z)$ ที่ถูกสร้างขึ้นจากวิธีการในงานวิจัย.....	64
รูปที่ 5.7	ภาพตัวอย่างของภาพถ่ายดาวเทียมที่นำมาใช้ในการทดสอบวิธีการ.....	65
รูปที่ 5.8	ภาพสามมิติของเมฆที่สร้างโดยวิธีในงานวิจัย ของภาพถ่ายดาวเทียมในรูปแบบที่ 5.7.....	66
รูปที่ 5.9	ภาพสามมิติซึ่งแสดงด้านที่เป็นส่วนหนาของเมฆจากการทดลองด้วยวิธีในงานวิจัย.....	67
รูปที่ 5.10	ภาพถ่ายดาวเทียมของเมฆจากเว็บไซต์วิกิพีเดีย.....	67
รูปที่ 5.11	ภาพสามมิติของเมฆที่สร้างโดยวิธีในงานวิจัย ของภาพถ่ายดาวเทียมในรูปแบบที่ 5.10.....	68
รูปที่ 5.12	ภาพถ่ายดาวเทียมตัวอย่าง และส่วนของภาพที่นำมาทดสอบ.....	70
รูปที่ 5.13	ตัวอย่างการแบ่งส่วนเมฆในภาพถ่ายดาวเทียม โดยภาพซ้ายเป็นการแบ่ง 10 ส่วน ภาพกลางเป็นการแบ่ง 20 ส่วน และภาพขวาเป็นการแบ่ง 36 ส่วน.....	70

รูปที่ 5.14 ตัวอย่างผลที่ไม่ถูกต้องในการจำลองภาพสามมิติด้วยวิธีการของงานวิจัย.....	71
รูปที่ 5.15 ภาพต้นทาง (ซ้าย) และภาพปลายทาง (ขวา) ที่นำมาทดลองสร้างเฟรม.....	72
รูปที่ 5.16 ภาพเคลื่อนไหวในสามมิติของการเปลี่ยนจากเลข 1 ไปเป็นเลข 2 ด้วยวิธีของงานวิจัยฯ (ก) – (จ) และแสดงการเรียงเฟรมต่อเนื่องกันภายในบรรทัดเดียว (ข)...	74
รูปที่ 5.17 ภาพที่นำมาทดสอบในกรณีที่พื้นที่เมฆส่วนใหญ่ของภาพต้นทาง (ซ้าย) และภาพปลายทาง (ขวา) ไม่ซ้อนทับกัน หรือเชื่อมต่อกันเพียงเล็กน้อย	74
รูปที่ 5.18 ภาพต่อเนื่องสามมิติที่สร้างจากภาพต้นทางและปลายทางของรูปที่ 5.17 ซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่ของทั้งสองภาพไม่เชื่อมต่อกัน	75
รูปที่ 5.19 ภาพถ่ายดาวเทียมต้นทาง (บนซ้าย), ภาพถ่ายดาวเทียมปลายทาง (บนขวา), ภาพสามมิติของภาพถ่ายดาวเทียมต้นทาง (ล่างซ้าย) และภาพสามมิติของภาพถ่ายดาวเทียมปลายทาง (ล่างขวา).....	76
รูปที่ 5.20 ภาพเคลื่อนไหวสามมิติของวิธีในงานวิจัยฯ จากภาพถ่ายดาวเทียมต้นทางจนถึงภาพถ่ายดาวเทียมปลายทางในรูปที่ 5.19 จำนวน 5 เฟรม (ก) – (จ) และแสดงการเรียงเฟรมต่อเนื่องกันภายในบรรทัดเดียว (ฉ).....	78
รูปที่ 5.21 ภาพถ่ายดาวเทียมต้นทาง (บนซ้าย), ภาพถ่ายดาวเทียมปลายทาง (บนขวา) โดยเลือกภาพถ่ายดาวเทียมในพื้นที่ ๑ แตกต่างกัน.....	78
รูปที่ 5.22 ภาพเคลื่อนไหวสามมิติของวิธีในงานวิจัยฯ จากภาพถ่ายดาวเทียมในรูปที่ 5.21 จำนวน 4 เฟรม (ก) – (ง) และแสดงการเรียงเฟรมต่อเนื่องกันภายในบรรทัดเดียว (จ).....	79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การติดตามดูความเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ โดยเฉพาะการศึกษาพลวัตที่เคลื่อนที่ตลอดเวลาของเมฆ มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำความเข้าใจลักษณะภูมิอากาศในบริเวณต่าง ๆ ของโลก เครื่องมือที่สำคัญประการหนึ่งซึ่งช่วยในการศึกษาสภาพอากาศ ได้แก่ ภาพถ่ายดาวเทียมที่บันทึกข้อมูลของเมฆในแต่ละช่วงเวลาสำหรับใช้เป็นข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา โดยภาพถ่ายดาวเทียมที่มีเมฆนั้นจะถูกบันทึกเป็นลำดับต่อเนื่องและสามารถนำมาเรียงต่อกันเป็นภาพเคลื่อนไหวของเมฆได้ อีกทั้งสามารถนำมาจำลองเป็นภาพสามมิติของเมฆเพื่อช่วยในการสังเกตและติดตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ

การสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆในระบบสามมิติจากภาพถ่ายดาวเทียม ดังตัวอย่างรูปที่ 1.1 สามารถนำไปใช้ได้หลายวัตถุประสงค์ โดยแบ่งเป็นเป้าหมายหลักได้ 2 กรณี คือกรณีที่ต้องการสร้างภาพสามมิติของเมฆจากข้อมูลจริงจึงนำภาพถ่ายดาวเทียมที่มีเมฆมาสร้างเป็นภาพสามมิติของเมฆ และกรณีที่ต้องการเพิ่มมุมมองการมองเมฆในภาพถ่ายดาวเทียมสองมิติที่มีอยู่เดิมด้วยการแสดงผลเป็นภาพสามมิติ อย่างไรก็ตามทั้งสองกรณีมีความต้องการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆในสามมิติจากภาพถ่ายดาวเทียมสองมิติที่มีอยู่เช่นเดียวกัน แต่แม้ว่าภาพถ่ายดาวเทียมจะมีข้อได้เปรียบในการนำมาสร้างภาพสามมิติ เนื่องจากสะดวกและมีข้อมูลของเมฆตามจริงในขณะนั้น ทว่าก็ยังข้อจำกัดที่จำเป็นต้องพิจารณา เช่นภาพถ่ายดาวเทียมแต่ละชนิดจะแสดงเพียงข้อมูลบางอย่างตามชนิดสัญญาณที่นำมาแปลงเป็นภาพ โดยภาพถ่ายดาวเทียมที่นำมาใช้กับงานวิจัยนี้ได้แก่ภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้ (visible satellite image) และชนิดอินฟราเรด (infrared satellite image) ซึ่งเป็นชนิดที่แสดงเมฆในรูปแบบที่มนุษย์เข้าใจ แต่กระนั้นก็มีเพียงข้อมูลของเมฆส่วนบนสุดหรือส่วนหนาที่สุด จึงจำเป็นต้องมีวิธีการที่ใช้ประมาณลักษณะของเมฆส่วนที่มองไม่เห็นเพิ่มเติม สำหรับในขั้นตอนการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆ ตามปกติภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรดจะถูกแปลงผลภาพห่างกันทุก ๆ 1 ชม. ส่วนภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้จะถูกบันทึกห่างกันหลายชั่วโมง ซึ่งในการติดตามเมฆโดยทั่วไป อาจไม่จำเป็นต้องมีความต่อเนื่องของช่วงเวลามากนัก แต่สำหรับงานที่เน้นความนุ่มนวลในการเคลื่อนตัวของเมฆ อาทิ ในโปรแกรมจำลองการบิน การแสดงมโนทัศน์ของอากาศ หรือในการรายงานสภาพภูมิอากาศ การสร้างภาพต่อเนื่องสำหรับการเคลื่อนไหวของเมฆก็ถือเป็นสิ่งจำเป็น

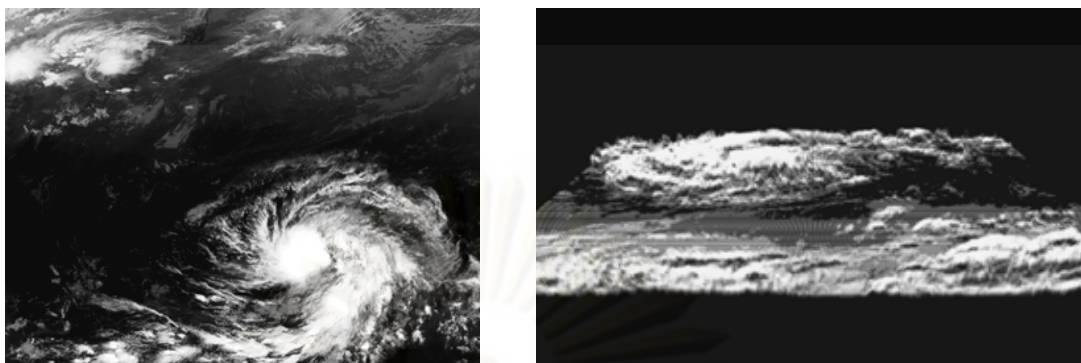
งานแสดงภาพเมฆสามมิติส่วนใหญ่ต้องการแสดงผลเมฆที่มีความสวยงามและชัดเจน ทั้งนี้ควรมีความคล้ายคลึงกับเมฆที่ปรากฏอยู่จริงในสายตาของมนุษย์ โดยผลที่นำมาเปรียบเทียบกับเป็นคุณภาพหลังการเรนเดอร์ (render) ซึ่งขึ้นอยู่กับความรู้สึกของผู้มอง

ในขณะที่ความถูกต้องของข้อมูลเป็นเรื่องรองลงมา และแม้ว่าผลของภาพจะเปรียบเทียบกันด้วยขั้นตอนการเรนเดอร์ แต่สิ่งที่สำคัญที่สุดของการแสดงภาพเมฆสามมิติก็คือกระบวนการในการสร้างข้อมูลสามมิติของเมฆจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่มีอยู่เดิม สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอวิธีที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับสร้างแบบจำลองสามมิติของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียม อีกทั้งจะเสนอวิธีสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียมต้นทางไปสู่ภาพถ่ายดาวเทียมปลายทาง โดยเป็นวิธีซึ่งแตกต่างไปจากการประมวลผลภาพถ่าย (image processing) ที่เคยมีมาแต่เดิม

งานวิจัยสร้างแบบจำลองภาพสามมิติของเมฆ รวมถึงการจำลองการเคลื่อนไหวของเมฆโดยปกติจะใช้วิธีการทางคอมพิวเตอร์กราฟิกส์ (computer graphics) โดยวิธีสร้างแบบจำลองของเมฆในงานวิจัยที่ผ่านมา ได้พยายามเติมเต็มปริมาณของเมฆด้วยกระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง อาทิเช่น การใช้เมตบอล (Metaballs) [1] การขึ้นรูปเมฆโดยแปะพื้นผิว (volume texture) การหาตำแหน่งสูงสุดของแนวระนาบเพื่อสร้างเป็นเทอร์เรน (terrain) ซึ่งบางวิธีก็ใช้เวลานานในการประมวลผล ส่วนบางวิธีก็ยังแสดงรายละเอียดของเมฆไม่สมจริง

สำหรับการสร้างภาพเคลื่อนไหวหรือการอนิเมชันเมฆ (cloud animation) จากภาพถ่ายดาวเทียม เป็นกระบวนการที่มักทำเพิ่มเติมจากการสร้างแบบจำลองสามมิติของเมฆเนื่องจากภาพถ่ายดาวเทียมที่ได้จะบันทึกเรียงกันเป็นลำดับต่อเนื่อง และบันทึกไว้ในช่วงเวลาที่ยาวกัน อย่างไรก็ตามการที่ดาวเทียมส่งกลับสัญญาณมายังภาคพื้นในเวลาที่ห่างกัน จะทำให้บางครั้งภาพเคลื่อนไหวที่นำมาเรียงกันมีความไม่ต่อเนื่อง และวิธีการที่มักนำมาแก้ไขภาพต่อเนื่องซึ่งมีช่วงเวลาห่างจากกันมาก คือการใช้วิธีประมวลผลทางภาพถ่าย (image processing) กับภาพถ่ายที่มีอยู่หรือภาพเฟรมหลัก (keyframe Image) เพื่อนำไปสร้างภาพถ่ายดาวเทียมในช่วงที่ไม่มีข้อมูลขึ้นมาทดแทน แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นแม้ว่าวิธีประมวลผลทางภาพถ่ายจะสามารถสร้างลำดับภาพถ่ายขึ้นมาใหม่ได้ ก็อาจยังไม่สามารถแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของเมฆได้ดีนัก เพราะเมฆแต่ละตำแหน่งเคลื่อนไปในทิศทางที่ต่างกัน อีกทั้งเมื่อเวลาผ่านไปเมฆบางส่วนอาจมีการหดหาย และบางส่วนอาจขยายเพิ่มขึ้นมาจากเดิม

สำหรับการปรับปรุงคุณภาพผลภาพสามมิติของเมฆที่สร้างจากภาพถ่ายดาวเทียม ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาวิธีการที่ใช้สร้างข้อมูลของเมฆทั้งสามมิติ ซึ่งได้นำหลักการบางส่วนของวิธีการเซลล์ลูอาร์อโตมาตามาเป็นต้นแบบ โดยขั้นตอนวิธีดังกล่าวจะอธิบายในหัวข้อที่ 4.1 ส่วนการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆสามมิตินี้ ได้พัฒนาวิธีการแลตทิซแก๊สอโตมาตาซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงสถานะของค่าภายในกริดที่ใช้แทนเวกเตอร์ของของไหลในแต่ละช่วงเวลา ด้วยการพิจารณาสถานะเวกเตอร์ของอนุภาครอบข้างที่เวลาก่อนหน้า เพื่อให้การเคลื่อนที่ของเมฆมีพลวัตเช่นเดียวกับการเคลื่อนไหลของของไหล โดยจะอธิบายวิธีที่ใช้สร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆในหัวข้อที่ 4.2



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างภาพสามมิติของเมฆที่สร้างจากภาพถ่ายดาวเทียมสองมิติ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อนำเสนอแนวทางในการสร้างเมฆสามมิติจากภาพถ่ายดาวเทียมเพียงภาพเดียว และสร้างการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องของเมฆในสามมิติจากภาพถ่ายดาวเทียมสองภาพ โดยจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ให้คล้ายการเคลื่อนที่ของของไหล

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ภาพถ่ายที่นำมาใช้ในการสร้างภาพสามมิติในงานวิจัยนี้ เป็นภาพถ่ายดาวเทียมจากดาวเทียมสำรวจสภาวะอากาศแบบประจำที่ (geostationary satellite) โดยใช้เฉพาะภาพถ่ายชนิดอินฟราเรด (infrared image) หรือชนิดสามารถเห็นได้ (visible Image)
2. ความสูงของชั้นเมฆในแกนตั้งที่สามารถสร้างแบบจำลองได้ จะมีความสูงไม่เกิน 128 ระดับ หรือไม่เกินเศษหนึ่งส่วนสองของจำนวนความละเอียดของภาพถ่ายดาวเทียมที่นำมาใช้
3. งานวิจัยนี้เป็นการเสนอการสร้างแบบจำลองโครงสร้างของเมฆ และแบบจำลองการเคลื่อนที่ของเมฆในสามมิติ เพื่อใช้ในงานสร้างมโนภาพของข้อมูลสภาพอากาศ ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีความถูกต้องของข้อมูลมากนัก
4. การสร้างข้อมูลภาพเมฆใหม่ ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของภาพเมฆตั้งต้นทั้งสองภาพจะไม่ทำการอนุรักษ์ปริมาณอนุภาคของเมฆ เนื่องจากในความเป็นจริงเมฆที่เรามองเห็นจะเกิดขึ้นและหายไปตลอดเวลาตามการควบแน่นและระเหิด

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยฯ หมายถึง งานวิจัยการสร้างภาพเคลื่อนไหวสามมิติโดยใช้
อโตมาตาแบบแก๊สแลตทิซ

ภาพถ่ายดาวเทียม (satellite image) หมายถึง ภาพที่บันทึกได้จากดาวเทียม
สำรวจสภาวะอากาศแบบประจำที่ (geostationary satellite) เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของ
สภาพอากาศในบริเวณเดียวกันเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

ภาพถ่ายดาวเทียมต้นทาง (source image) หมายถึง ภาพที่เป็นจุดเริ่มต้นใน
การสร้างภาพเคลื่อนไหว

ภาพถ่ายดาวเทียมปลายทาง (destination image) หมายถึง ภาพที่เป็น
จุดสิ้นสุดในการสร้างภาพเคลื่อนไหว

เซลล์ (cell) หมายถึง หน่วยเล็กที่สุดเมื่ออ้างอิงถึงวิธีทางเซลล์ลาร์อโตมาตา

บัพ (node) หมายถึง หน่วยที่เล็กที่สุดเมื่ออ้างอิงถึงวิธีเซลล์ลาร์อโตมาตาแบบ
แก๊สแลตทิซ ซึ่งเป็นจุดที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านในแต่ละชั้นเวลา

ขั้นเวลา (time step) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของเวลาในแต่ละครั้งที่มีการ
เปลี่ยนสถานะของค่าที่สนใจ

ช่วงเวลา (time interval) หมายถึง ช่วงระยะเวลาที่ต่อเนื่องกันหนึ่ง ๆ

กริด (grid) หมายถึง ตารางที่อ้างอิงเกี่ยวกับงานคอมพิวเตอร์กราฟิกส์ โดยใช้
สำหรับการเก็บค่า หรือแสดงผลของสิ่งที่กำลังสนใจ

แลตทิซ (lattice) หมายถึง โครงสร้างการเชื่อมต่อบัพ หรือระบบของการ
เชื่อมโยงบัพ ซึ่งใช้อ้างอิงในวิธีการทางเซลล์ลาร์อโตมาตา

เพื่อนบ้าน (neighbor) หมายถึง เซลล์ หรือบัพที่อยู่ข้างเคียงของเซลล์หรือบัพ
ที่กำลังอ้างอิงถึง

พิกเซล (pixel) หมายถึง ตารางที่เก็บค่าจุดค่าสี (intensity) ซึ่งอ้างอิงตำแหน่ง
ในระบบสองมิติ

วอกเซล (voxel) หมายถึง ตารางที่เก็บข้อมูล เช่นค่าของจุดสี (intensity) หรือ
ค่าความหนาแน่น (Density) ซึ่งอ้างอิงตำแหน่งในระบบสามมิติ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

งานวิจัยการสร้างภาพเคลื่อนไหวสามมิติโดยใช้อโตมาตาแบบแก๊ส
แลตทิซจะสร้างภาพต่อเนื่อง 3 มิติของภาพถ่ายดาวเทียม 2 มิติ ในลักษณะเดียวกับของไหล

ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการรายงานข่าวพยากรณ์อากาศทางโทรทัศน์ หรือใช้ในการแสดงผลภาพสามมิติเพื่อติดตามและสังเกตการณ์เคลื่อนที่ของพายุ เป็นต้น

1.6 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย
2. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองเมฆในสามมิติ งานวิจัยการจำลองเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียม และงานวิจัยการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆ
3. พัฒนารูปแบบการเพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม
4. ทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดสอบ
5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
6. จัดทำรายงานวิทยานิพนธ์

1.7 ผลงานตีพิมพ์จากงานวิจัย

ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์เป็นบทความทางวิชาการในหัวข้อเรื่องดังนี้

- “The Generating of 3D Cloud by using Cellular Automata” โดย ณิชฐวีร์ โควสุวรรณ และ พิษณุ คนองชัยยศ ในงานประชุมวิชาการ “The 6th Joint International Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE2009)”: ซึ่งจัดขึ้นที่ ภูเก็ต ประเทศไทย ในระหว่างวันที่ 14-15 พฤษภาคม 2552
- “3D Cloud Animation using CA Based Method” โดย ณิชฐวีร์ โควสุวรรณ และ พิษณุ คนองชัยยศ ในงานประชุมวิชาการ “2009 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS2009)”: ซึ่งจัดขึ้นที่ คานาซาวา ประเทศญี่ปุ่น ในระหว่างวันที่ 7-9 ธันวาคม 2552

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาแบบจำลองของเมฆในระบบสามมิติ เพื่อนำมาใช้สร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆในสามมิติสามารถทำได้หลายวิธีการ ส่วนใหญ่ถูกพัฒนาขึ้นด้วยวิธีการคอมพิวเตอร์กราฟิกส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างภาพสามมิติของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียมสองมิติซึ่งมีเพียงข้อมูลบางประการของเมฆที่บันทึกและแปลผลจากดาวเทียมสำรวจสภาพอากาศในแต่ละบริเวณ โดยเนื้อหาในบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีที่งานวิจัยฯ นำมาอ้างอิง เพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับสร้างข้อมูลสามมิติของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียม สร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆจากข้อมูลสามมิติดังกล่าว

ภาพถ่ายดาวเทียมของเมฆที่งานวิจัยฯ นี้เลือกใช้ ได้แก่ภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้ (visible satellite image) และชนิดอินฟราเรด (infrared satellite image) ซึ่งค่าสีในภาพถ่ายดาวเทียมทั้งสองชนิด สามารถอ้างอิงความความหนา หรือความสูงของชั้นเมฆ จึงทำให้งานวิจัยฯ ที่ทำการสร้างภาพเมฆสามมิติจากภาพถ่ายดาวเทียมส่วนใหญ่นำมาใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นเพื่อกำหนดจุดสูงสุดของระดับเมฆ โดยอธิบายเนื้อหาของทฤษฎีของเมฆและภาพถ่ายดาวเทียมในหัวข้อที่ 2.1

ทฤษฎีบทของวิธีการเซลล์ลาร์อโตมาตา (CA) ในหัวข้อที่ 2.3.1 เป็นแนวคิดที่งานวิจัยฯ นำมาปรับใช้เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียม และมีวิธีทางเซลล์ลาร์อโตมาตาของของไหล (LGCA) หรือแลตทิซแก๊สอโตมาตา (LGA) ในหัวข้อที่ 2.3.2 เป็นวิธีเซลล์ลาร์อโตมาตาอีกวิธีหนึ่งที่ใช้แสดงลักษณะของของไหล (fluid flow) ซึ่งงานวิจัยฯ ได้เลือกวิธีดังกล่าวมาสร้างเป็นภาพเคลื่อนไหวของเมฆ ทั้งนี้ก็เพราะข้อมูลของภาพถ่ายดาวเทียมที่ใช้มีเฉพาะค่าสีของเมฆในแต่ละตำแหน่ง จึงทำให้ไม่ทราบทิศทางจริงที่เมฆเคลื่อนตัวไป ในขณะที่แบบจำลองแลตทิซแก๊สอโตมาตา ทราบเพียงเฉพาะข้อมูลสถานะของเพื่อนบ้านรอบข้าง (ในที่นี้คือค่าสี) ก็สามารถอัปเดตค่าใหม่ของตัวเองได้ ผู้วิจัยจึงทดลองนำวิธีดังกล่าวมาใช้สร้างรูปแบบการเคลื่อนตัวของเมฆในสามมิติ

สำหรับชนิดของแลตทิซแก๊สอโตมาตาที่นำมาทดลองใช้เป็นชนิด FPH เนื่องจากมีบัพ (node) ของเพื่อนบ้านเพียง 6 บัพ ในระนาบสองมิติ ซึ่งบัพจำนวน 6 บัพดังกล่าวสามารถชี้เวกเตอร์ความเร็วของเมฆแต่ละตำแหน่งได้ 6 ทิศทาง จึงสามารถกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ที่แตกต่างได้พอสมควรแต่ไม่ยุ่งยากกับการกำหนดกฎ และเป็นชนิดที่อนุรักษ์กฎโมเมนตัม อย่างไรก็ตามงานวิจัยฯ ได้ปรับเปลี่ยนรูปแบบและวิธีการบางส่วนให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆในสามมิติจากภาพถ่ายดาวเทียมตั้งต้น ไปยังภาพถ่ายดาวเทียมปลายทาง วิธีการของงานวิจัยจะอธิบายต่อไปในบทที่ 4

2.1 ทฤษฎีเมฆและภาพถ่ายดาวเทียม

2.1.1 เมฆ (Cloud)

ประมาณ 60% ของโลกปกคลุมด้วยเมฆซึ่งเป็นกลุ่มละอองน้ำหรือผลึกน้ำแข็งที่ลอยตัวขึ้นไปควบแน่นอยู่บนชั้นบรรยากาศของโลก นอกจากเมฆที่มองเห็นบนโลกแล้ว ยังมีเมฆที่ถูกค้นพบที่ดาวดวงอื่นและในห้วงอวกาศ เช่น เมฆระหว่างดวงดาว (interstellar cloud) และเนบิวลา (Nebula) สำหรับเมฆในโลกของเรานั้นเกิดจากไอของหยดละอองน้ำหรือผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.01 มิลลิเมตร ซึ่งถูกแรงยกตัวของอากาศ (air parcel) หรืออากาศที่เคลื่อนตัวในแนวตั้ง ยกให้ลอยตัวสูงขึ้นแล้วควบแน่นที่ความสูงเหนือกว่าระดับควบแน่นในอุณหภูมิต่ำกว่าจุดน้ำค้าง ซึ่งไอน้ำเหล่านี้เมื่อรวมตัวกันหลายพันล้านอนุภาคก็จะกลายเป็นเมฆบนท้องฟ้า เมฆสามารถสะท้อนคลื่นแสงจากดวงอาทิตย์ในช่วงความถี่ที่ตามองเห็นได้เท่า ๆ กัน จึงทำให้เรามองเห็นเมฆเป็นโทนสีขาว แต่บางครั้งเราอาจเห็นเมฆบางส่วนเป็นสีเทา เพราะแสงไม่สามารถทะลุผ่านไปถึงส่วนล่างของเมฆ โดยเฉพาะเมฆที่มีความหนาแน่นสูง เช่น เมฆฝน นอกจากนี้เมฆอาจจะแสดงสีอื่น ๆ ได้อีกหลากหลายทั้งในช่วงที่ดวงอาทิตย์โผล่ขึ้นตอนเช้าหรือในยามลับขอบฟ้า

เมฆมีหลายลักษณะในทางอุตุนิยมวิทยามักจะแบ่งเมฆตามความสูงของฐานเมฆ ได้แก่ เมฆชั้นสูง (high cloud), เมฆชั้นกลาง (medium cloud), เมฆชั้นต่ำ (low cloud) และเมฆที่ก่อตัวในทางตั้ง (vertical development cloud) โดยจะใช้คำในภาษาลาตินตั้งชื่อเมฆตามลักษณะที่สังเกตเห็นจากพื้นดินซึ่งได้แก่ เคอร์มูลัส (Cumulus) ที่แปลว่าก้อน, สตราตัส (Stratus) ที่แปลว่าแผ่น, เซิร์ริส (Cirrus) ที่แปลว่าปุยหรือลอน และนิมบัส (Nimbus) ที่แปลว่าฝน ลักษณะของเมฆแต่ละชนิดสามารถบ่งบอกสภาวะอากาศที่กำลังเกิดขึ้นได้ แสดงตัวอย่างของเมฆลักษณะต่าง ๆ ในภาคผนวก

ภาพของเมฆสามารถถูกบันทึกได้จากพื้นโลก จากฟากฟ้า และจากอวกาศ ซึ่งภาพที่บันทึกจากพื้นดินสามารถถ่ายได้ด้วยกล้องชนิดต่างๆ ส่วนภาพที่ถ่ายจากท้องฟ้าก็อาจถ่ายโดยใช้เครื่องบินเป็นพาหนะ และสำหรับภาพถ่ายจากอวกาศนั้นโดยปกติจะถ่ายจากดาวเทียมเพื่อการพยากรณ์อากาศ เช่น จีเอ็มเอส (GMS), จีโออีเอส (GOES), เอ็นโอเอเอ (NOAA) และทีโรส (TIROS) เป็นต้น

2.1.2 ภาพถ่ายดาวเทียม (Satellite Imagery)

ภาพที่ถ่ายได้จากดาวเทียม (satellite imagery) ประเภทต่างๆ จะปรากฏลักษณะที่แตกต่างกันตามย่านความยาวคลื่น (band) ของช่วงแสงสีที่ตรวจจับได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของดาวเทียม เช่น ดาวเทียมสำรวจสภาวะอากาศ ดาวเทียมสำรวจทรัพยากรธรรมชาติ ดาวเทียมสำรวจสภาพภูมิประเทศ เป็นต้น โดยตัวอย่างย่านความถี่ของ

ภาพถ่ายดาวเทียมแลนแซท 7 (Landsat 7) ที่องค์การนาซา (NASA) ใช้สำหรับการสแกนพื้นผิวของโลกดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงย่านความยาวคลื่นของช่วงแสงประเภทต่างๆ

ย่านความยาวคลื่น	ความยาวคลื่น	ลักษณะช่วงแสงสี
ย่านความยาวคลื่นที่ 1	0.45 - 0.52 μm	ช่วงแสงสีฟ้าที่มองเห็นได้ (visible blue) ออกแบบเพื่อการสำรวจพื้นที่น้ำ ดิน พืชผลทางการเกษตร และป่าไม้
ย่านความยาวคลื่นที่ 2	0.53 - 0.61 μm	ช่วงแสงสีเขียวที่มองเห็นได้ (visible Green)
ย่านความยาวคลื่นที่ 3	0.63 - 0.69 μm	ช่วงแสงสีแดงที่มองเห็นได้ (visible Red)
ย่านความยาวคลื่นที่ 4	0.75 - 0.90 μm	ช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรด (near infrared)
ย่านความยาวคลื่นที่ 5	1.55 - 1.75 μm	ช่วงคลื่นตรงกลางของอินฟราเรด (mid infrared)
ย่านความยาวคลื่นที่ 6	10.4 - 12.5 μm	ช่วงคลื่นอุณหภูมิ (thermal)
ย่านความยาวคลื่นที่ 7	2.09 - 2.35 μm	ช่วงคลื่นอินฟราเรดสั้น (short wave infrared)
ย่านความยาวคลื่นที่ 8	0.52 - 0.90 μm	ช่วงคลื่นสีเขียวที่มองเห็นได้ใกล้อินฟราเรด (visible green to near infrared)

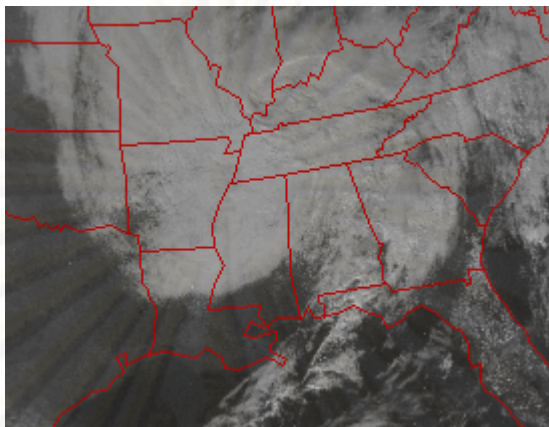
สำหรับดาวเทียมสำรวจสภาวะอากาศ (weather image) จะใช้ในการตรวจจับสภาพภูมิอากาศของโลก โดยมีทั้งชนิดที่โคจรรอบโลก (polar orbit) และชนิดที่อยู่ประจำที่ (geostationary orbit) ดาวเทียมแบบโคจรรอบโลกจะโคจรผ่านตำแหน่งเดิมทุกๆ 12 ชั่วโมง ทำให้สามารถบันทึกภาพ ณ ตำแหน่งเดิมได้ 2 ครั้งใน 1 วัน ส่วนแบบที่อยู่ประจำที่ซึ่งจะโคจร 22,000 ไมล์เหนือเส้นศูนย์สูตร ดาวเทียมชนิดนี้จะมีความเร็วในการโคจรเท่ากับการหมุนรอบตัวเองของโลกจึงทำให้สามารถถ่ายภาพในตำแหน่งที่ต้องการได้ทุกๆ ชั่วโมง

สำหรับภาพถ่ายดาวเทียมของเมฆ (satellite cloud image) มักจะถูกบันทึกด้วยดาวเทียมสำรวจสภาวะอากาศแบบอยู่ประจำที่ ซึ่งมีทั้งภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้ (visible satellite image) ภาพถ่ายดาวเทียมแบบชนิดอินฟราเรด (infrared satellite image) และภาพถ่ายดาวเทียมแบบแบบละอองของน้ำ (water satellite image) [2]

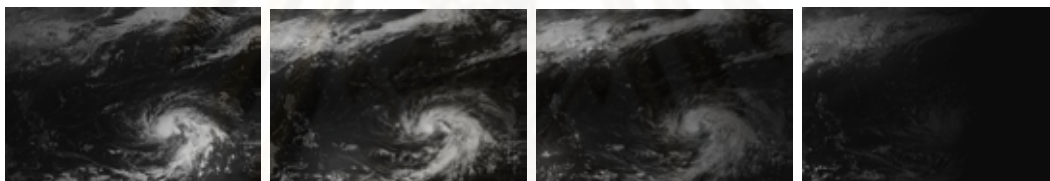
2.1.2.1 ภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้ (visible satellite image)

ภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้ จะมีเซนเซอร์รับแสงเพื่อบันทึกภาพในช่วงสเปกตรัมของแสงที่มองเห็นได้ (visible-light) ซึ่งปกติแล้วเมฆและน้ำแข็งจะถูกแสดงเป็น

สีสว่าง โดยส่วนที่สว่างที่สุดหมายถึงเมฆส่วนที่หนาที่สุด สำหรับพื้นดินก็จะถูกแสดงด้วยสีเทา และน้ำทะเลจะถูกแสดงด้วยสีดำ ภาพถ่ายดาวเทียมแบบนี้จะถูกเก็บข้อมูลได้เฉพาะช่วงที่มีแสงอาทิตย์เท่านั้น ภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้แสดงดังรูปที่ 2.1 และภาพถ่ายในพิภักเดียวกันตามช่วงเวลาต่าง ๆ ของวันแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้

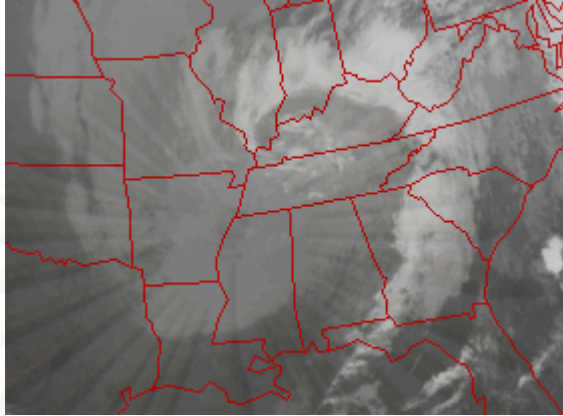


รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้ ณ พิกัดเดียวกัน ในแต่ละช่วงเวลา

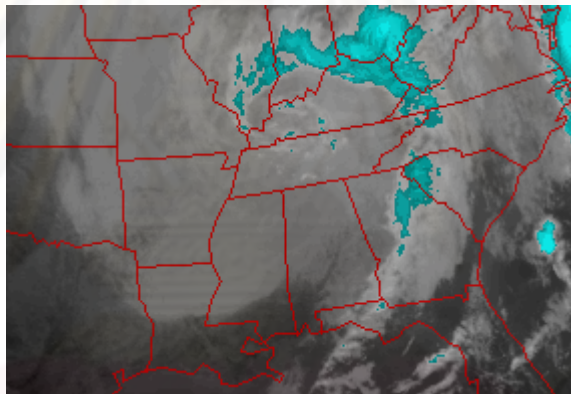
2.1.2.2 ภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรด (infrared satellite image)

ภาพถ่ายดาวเทียมประเภทนี้จะแสดงความร้อนที่กระจายในช่วงสเปกตรัมของอินฟราเรด (infrared) หรือกล่าวได้ว่าพื้นผิวที่อุ่นกว่าจะมีคลื่นอินฟราเรดมากกว่า ทำให้ภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรดแสดงส่วนที่เย็นด้วยสีสว่าง และแสดงส่วนที่ร้อนด้วยสีที่มืด ฉะนั้นพื้นผิวของเมฆซึ่งมีความเย็นมากกว่าพื้นดินจึงปรากฏเป็นสีสว่าง ในขณะที่พื้นดินปรากฏเป็นสีที่มีความมืด สำหรับเมฆชั้นล่าง (low cloud) จะถูกแสดงเป็นสีเทา ในขณะที่เมฆที่อยู่ชั้นบนกว่า (higher cloud) จะมีค่าความเป็นสีขาวหรือสีสว่างมากกว่า เช่น กรณีของพายุเมฆสูง (tall thunderstorm cloud) จะแสดงด้วยสีขาวสว่าง และกรณีของหมอกค่อนข้างยากที่จะแยกแยะออกจากพื้นดิน สำหรับภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรดนั้นสามารถถูกจัดเก็บได้ตลอด 24 ชั่วโมงเนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้แสงจากพระอาทิตย์ ภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรดแสดงดังรูปที่ 2.3 และแสดงภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรดในตำแหน่งเดียวกันตามช่วงเวลาต่าง ๆ ของวันดังรูปที่ 2.5

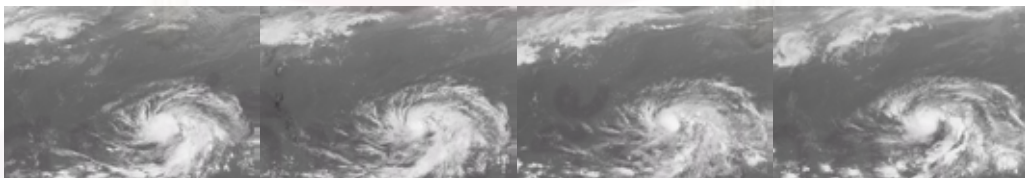
นอกจากนี้ยังมีภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรดที่ปรับชัด (enhanced infrared image) โดยจะทำการเน้นภาพของส่วนที่เป็นเมฆ และโดยเฉพาะส่วนที่เย็นที่สุดหรือหมายถึงส่วนที่เป็นเมฆบนสุด (top cloud) ดังแสดงเป็นส่วนของสีฟ้าในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรด



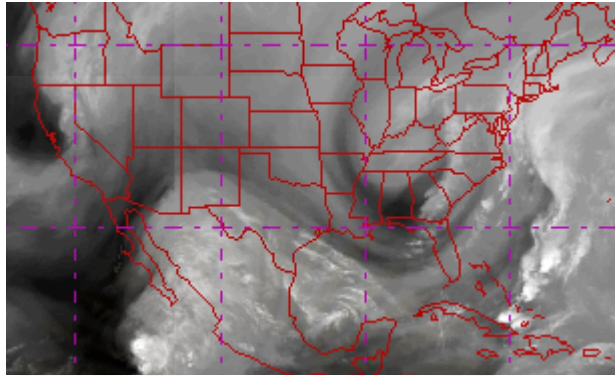
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรดที่ปรับชัดเมฆบนสุด



รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรด ณ พิกัดเดียวกัน ในแต่ละช่วงเวลา

2.1.2.3 ภาพถ่ายดาวเทียมแบบละอองของน้ำ (water vapor satellite image)

สำหรับภาพถ่ายดาวเทียมแบบละอองน้ำจะแตกต่างออกไปจากภาพถ่ายดาวเทียมสองแบบข้างต้น เนื่องจากภาพถ่ายชนิดนี้จะบันทึกค่าความชื้น จึงทำให้ลักษณะภาพที่ปรากฏต่างจากลักษณะของเมฆที่มองด้วยสายตามนุษย์ แสดงไว้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมชนิดละอองน้ำ

2.1.3 การสร้างลำดับต่อเนื่องของภาพถ่ายดาวเทียม

โดยทั่วไปการสร้างลำดับต่อเนื่องของภาพถ่ายดาวเทียม จะนำภาพถ่ายจากดาวเทียมที่ประมวลผลแล้วในแต่ละช่วงเวลามาเรียงต่อกันเพื่อสร้างเป็นภาพเคลื่อนไหว ซึ่งทางคอมพิวเตอร์แอนิเมชันเรียกภาพที่นำมาเรียงต่อกันว่า “เฟรมหลัก” (keyframe) อย่างไรก็ตามแม้ภาพเคลื่อนไหวในลักษณะดังกล่าวจะช่วยให้สามารถสังเกตการเคลื่อนไหวของเมฆ แต่กับงานที่ต้องการความชัดเจนในชั้นแสดงผลและขยายขอบเขตมุมมองที่มากขึ้น การใช้ภาพเคลื่อนไหวซึ่งเรียงต่อกันด้วยภาพถ่ายอาจยังไม่เพียงพอนัก

2.1.4 ภาพถ่ายดาวเทียมของเมฆที่นำมาใช้ในงานวิจัย

ชนิดภาพถ่ายดาวเทียมที่นำไปใช้สำหรับงานวิจัยฯ ได้แก่ ภาพถ่ายจากดาวเทียมสำรวจสภาวะอากาศชนิดสามารถเห็นได้ และชนิดอินฟราเรด เนื่องจากเป็นภาพที่มีข้อมูลของเมฆบริเวณที่ต้องการ ภาพถ่ายดาวเทียมทั้งสองชนิดนี้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางไม่เฉพาะแต่การสร้างภาพสามมิติของเมฆ ทั้งนี้เพราะการแสดงข้อมูลเมฆในรูปแบบดังกล่าวสามารถเข้าใจง่ายจากประสบการณ์ของมนุษย์ และคล้ายคลึงกับการสังเกตลักษณะของเมฆจากอวกาศ อีกทั้งยังเป็นทรัพยากรที่มีต้นทุนไม่สูงมาก จึงสะดวกในการนำมาใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นของงานวิจัย

สำหรับข้อมูลที่มีอยู่ในภาพถ่ายดาวเทียมเมฆได้แก่ สีเมฆ (intensity) ของจุดภาพ (pixel) ซึ่งในภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้จะแทนความหนาของเมฆ ส่วนภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรดจะแทนชั้นเมฆที่อยู่สูงสุด ณ บริเวณนั้น งานวิจัยนี้จึงใช้สีเมฆในจุดของภาพถ่ายดาวเทียมเป็นข้อมูลนำเข้า (input) โดยถือว่าสีที่สว่างที่สุดของภาพถ่ายดาวเทียมเป็นเมฆที่อยู่ชั้นบนสุด ส่วนสีที่มืดที่สุดเป็นพื้นดินหรือพื้นน้ำ

อย่างไรก็ดีในขั้นการทดลอง ภาพถ่ายดาวเทียมที่นำมาใช้จะเป็นภาพถ่ายดาวเทียมที่มีเฉพาะเมฆและพื้นมหาสมุทรเท่านั้น โดยภาพถ่ายดาวเทียมที่มีส่วนของพื้นดินจะ

ยังไม่นำมาใช้เป็นข้อมูลนำเข้า เนื่องจากสีที่แตกต่างของพื้นดินจะต้องใช้วิธีการเพิ่มเติมในการแยกแยะส่วนของพื้นดิน และส่วนของเมฆออกจากกัน

2.2 การสร้างภาพเคลื่อนไหวในทางคอมพิวเตอร์กราฟิกส์

สำหรับพื้นฐานการสร้างภาพเคลื่อนไหวในทางคอมพิวเตอร์กราฟิกส์มีหลายวิธีการ เช่นการประมาณค่าช่วง (interpolation), การใช้คีย์เฟรม (key-frame system), การเปลี่ยนรูปร่างวัตถุ (deforming object), การหลอมภาพ (morphing), การประมาณค่าช่วงในสามมิติ (3D shape interpolation) ไปจนถึงการใช้เส้นโค้ง (curve) และการกำหนดเส้นทาง (path following) เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ นอกจากนี้ยังมีวิธีสร้างภาพเคลื่อนไหวเชิงกระบวนการ (procedural animation) ที่ถูกใช้ในการนิยามการเคลื่อนที่ตามเวลาที่เปลี่ยนไป ซึ่งอาจจะใช้กฎทางฟิสิกส์ (physically-based modeling) หรือสร้างวิธีการที่ใช้สำหรับสร้างภาพเคลื่อนไหวขึ้นมา (animator generated method) ซึ่งงานวิจัย ก็ได้กำหนดวิธีการเพื่อนิยามเส้นทางการเคลื่อนที่ของเมฆในตำแหน่งต่าง ๆ บนกริดสามมิติ โดยประยุกต์เอาการเคลื่อนที่ตำแหน่งของอนุภาคของไหลในวิธีทางเซลล์ลูลาร์อัตโนมัติแบบแก๊สแลตทิซมาสร้างเป็นภาพเคลื่อนไหวเชิงกระบวนการของงานวิจัย

2.3 วิธีการทางเซลล์ลูลาร์อัตโนมัติ (Cellular automata: CA)

2.3.1 ทฤษฎีบทเซลล์ลูลาร์อัตโนมัติ

เซลล์ลูลาร์อัตโนมัติ (Cellular Automaton: เอกพจน์) หรือเซลล์ลูลาร์อัตโนมัติ (Cellular Automata: พหูพจน์) เป็นแนวคิดของระบบกายภาพที่มีปริภูมิและเวลาเป็นหน่วยเต็ม (discrete) ซึ่งบางรูปแบบปรากฏให้เห็นได้ในธรรมชาติ ดังภาพตัวอย่างในรูปที่ 2.7

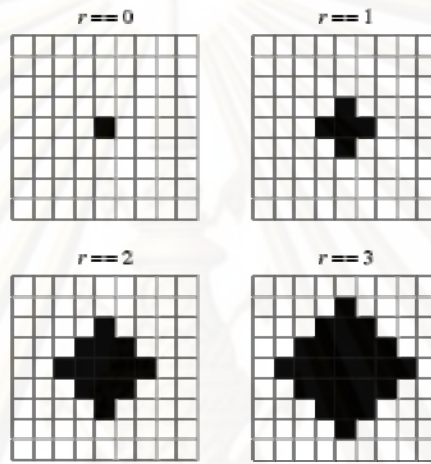


รูปที่ 2.7 ลักษณะของเซลล์ลูลาร์อัตโนมัติที่ปรากฏตามธรรมชาติ

วิธีการเซลล์ลูลาร์อัตโนมัติถือกำเนิดขึ้นขณะที่จอห์น วอน นีอูมานน์ (John Von Neumann) กำลังศึกษาระบบการทำซ้ำหรือจำลองตัวเองใหม่ของหุ่นจำลอง (self-replicating systems) โดยให้หุ่นจำลองที่เกิดขึ้นใหม่แต่ละตัวมีผลสืบเนื่องมาจากหุ่นจำลองตัวอื่น แต่วอน นีอูมานน์พบว่า การออกแบบระบบด้วยวิธีกลศาสตร์การเคลื่อนที่ (kinematic) มีความยุ่งยากและมีต้นทุนสูง ขณะเดียวกัน สแตนนิสลอว์ อูลัม (Stanislaw Ulam) เพื่อนร่วม

สถาบันของเขา ได้ศึกษาการเติบโตของคริสตอลภายใต้การจำลองโครงข่ายแบบตาข่าย (lattice network) อุลล์มจึงแนะนำให้นีอูมานน์ลองใช้บทนิยามทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวมาพัฒนา งานวิจัย ด้วยเหตุนี้วอน นีอูมานน์ จึงได้สร้างเซลล์ูลาร์อโตมาตาในแบบฉบับของตัวเองขึ้น ชื่อว่าเซลล์ูลาร์อโตมาตาของวอน นีอูมานน์ (Von Neumann's cellular automata)

เซลล์ูลาร์อโตมาตาของวอน นีอูมานน์ ทำงานอยู่ในปริภูมิ 2 มิติ และมีทั้งหมด 29 สถานะ (States) แตกต่างกัน โดยสร้างเงื่อนไขที่แต่ละสถานะในลำดับต่อไปของแต่ละเซลล์ ขึ้นอยู่กับเซลล์ข้างเคียง ซึ่งเรียกว่าเซลล์เพื่อนบ้านของวอน นีอูมานน์ (Von Neumann's neighborhood) [3]



รูปที่ 2.8 ภาพแสดงเซลล์เพื่อนบ้านของวอนนีอูมานน์

เซลล์เพื่อนบ้านของวอน นีอูมานน์ เป็นลักษณะของเซลล์ูลาร์อโตมาตาในสอง มิติ ซึ่งขยายตัวเองด้วยกฎหรือสมการเดียวกันทุกเซลล์ สามารถแทนได้ด้วย

$$N_{x_0, y_0}^r = \{(x, y) : |x - x_0| + |y - y_0| \leq r\} \quad 2.1$$

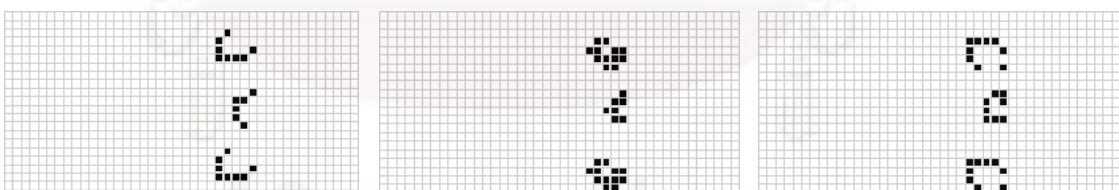
จากสมการที่ 2.1 เมื่อ (x_0, y_0) เป็นตำแหน่งพิกัดของเซลล์เริ่มต้น และ r เป็น เรจจ์ (range) หรือลำดับเวลาที่ผ่านไปในแต่ละสถานะ (state) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของเรจจ์ เป็น $r = 1, 2$ และ 3 ภายในกริด (grid) มีการขยายพื้นที่ของเซลล์ในลักษณะสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด (diamond-Shape) ตามที่แสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งจะทำให้จำนวนเซลล์แต่ละลำดับเวลาเท่ากับ $2r(r + 1) + 1$ หรือเท่ากับ $1, 5, 13, 25, \dots$ ตามลำดับ นอกจากนี้วอน นีอูมานน์ได้พิสูจน์ว่า เซลล์ูลาร์อโตมาตาเป็นรูปแบบที่สามารถสร้างตัวเองได้อัตโนมัติ และใช้เพียงวิธีการเดียวในการกำหนดสถานะของแต่ละเซลล์ อุลล์มได้เสนอเพิ่มเติมว่าระบบของเซลล์ูลาร์อโตมาตา เกิดขึ้นจากกลไกสองมิติที่เชื่อมต่อกัน (two-dimensional mesh of finite state machines) เรียกว่าเซลล์ (cell) โดยการเปลี่ยนแปลงของแต่ละเซลล์จะขึ้นอยู่กับเซลล์ข้างเคียง (neighbor)

และแต่ละเซลล์จะมีเงื่อนไขแห่งการเปลี่ยนแปลง (update rule) เดียวกัน ซึ่งระบบของเซลล์นั้น มักมีลักษณะคล้ายคลึงกับระบบทางกายภาพและระบบทางชีววิทยาที่มีอยู่ตามธรรมชาติ [4]

แม้ว่าวอน นีอูมานน์ได้พัฒนาเซลล์ูลาร์อโตมาตา 2 มิติ ขึ้นมา แต่ก็มีถึง 29 สถานะที่ต่างกัน อีกทั้งยังเป็นระบบที่ค่อนข้างใหญ่และยุ่งยากที่จะทำความเข้าใจ ต่อมาเอ็ดวาร์ด เอฟ คูด (Edward F. Cood) ได้พัฒนารูปแบบของเซลล์ูลาร์อโตมาตาให้เหลือเพียง 8 สถานะที่แตกต่างกัน โดยมีลักษณะเป็นแบบเซลล์เพื่อนบ้านของมัวร์ (Moore's neighborhood) คือขยายตัวในลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส [5] ซึ่งไม่กี่ปีหลังจากนั้นจอห์น ฮอร์ตอน คอนเวย์ (John Horton Conway) ก็ได้พัฒนาเกมออฟไลฟ์ (game of life) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.9 ขึ้นจนกลายเป็นที่รู้จักแพร่หลายในเวลาต่อมา [6]

กฎของเกมออฟไลฟ์นั้น แต่ละเซลล์จะมีสถานะใดสถานะหนึ่งระหว่างมีชีวิต (แทนด้วยเซลล์สีเข้มสีดำ) และไม่มีชีวิตหรือตาย (แทนด้วยเซลล์สีขาวหรือไม่มีสี) ซึ่งความเป็นความตายของแต่ละเซลล์เป็นผลมาจากเซลล์ที่อยู่รอบข้างที่เรียกว่าเซลล์เพื่อนบ้าน โดยการมีชีวิตอยู่รอดของแต่ละเซลล์จะมีเงื่อนไขดังนี้

- เซลล์ที่มีชีวิต ซึ่งมีเพื่อนบ้าน 2 หรือ 3 เซลล์ จะมีชีวิตอยู่ต่อไป
- เซลล์ที่มีชีวิต ซึ่งมีเพื่อนบ้านน้อยกว่า 2 เซลล์ จะตายในเวลาต่อมา เนื่องจากความเหงา
- เซลล์ที่มีชีวิต ซึ่งมีเพื่อนบ้านมากกว่า 3 เซลล์ จะเป็นตายในเวลาต่อมา เนื่องจากความแออัด
- เซลล์ที่ไม่มีชีวิต ซึ่งมีเพื่อนบ้าน 3 เซลล์พอดี จะเกิดใหม่ในเวลาต่อมา



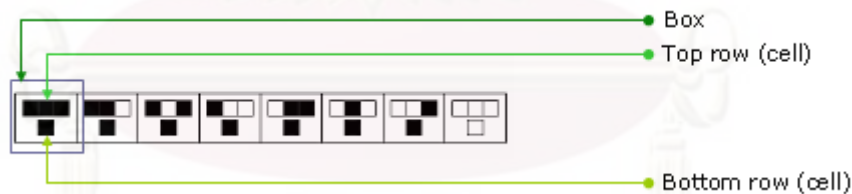
รูปที่ 2.9 กริดแสดงสถานะของแต่ละเซลล์ในเกมออฟไลฟ์ ณ สเตรทที่ต่างกัน

ราวต้นปีค.ศ. 1980 สตีเฟน วูล์ฟแฟรม (Stephen Wolfram) ตั้งข้อสังเกตว่าสามารถน้อยกว่าปีที่ผ่านมา นักวิทยาศาสตร์พยายามใช้สมการที่ยุ่งยากเพื่อแก้ปัญหาอันซับซ้อนของธรรมชาติ ทำให้สมการหนึ่งสามารถใช้อธิบายได้เฉพาะเหตุการณ์หนึ่งเท่านั้น และไม่สามารถใช้แก้ปัญหาที่ซับซ้อนได้ด้วยสมการเพียงสมการเดียว เขาจึงพัฒนาเซลล์ูลาร์อโตมาตาสำหรับทฤษฎีแห่งความซับซ้อน (theory of complexity) โดยทฤษฎีดังกล่าวได้กลายเป็นต้นกำเนิดของงานวิจัยระบบเชิงซับซ้อน (complex system research)

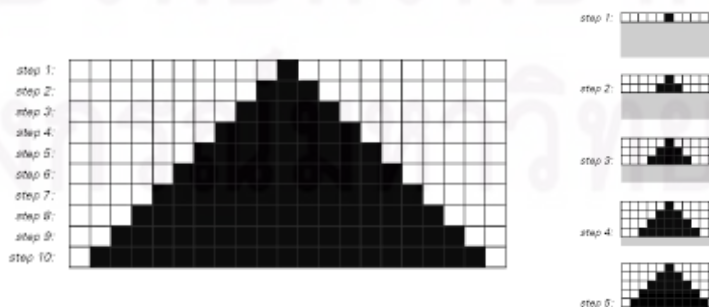
วูล์ฟเฟรมได้ใช้เวลามากกว่า 20 ปี เพื่อรวมวิทยาศาสตร์แขนงต่าง ๆ และเขียนหนังสือวิทยาศาสตร์แขนงใหม่ (A New Kind of Science) [7] เพื่อแสดงผลพีชิ่งที่เขาได้ศึกษาและพัฒนาขึ้น หนังสือเล่มดังกล่าวใช้แนวคิดของเซลลูลาร์ออโตมาตาเป็นองค์ประกอบหลักในการอธิบายรูปแบบที่ซับซ้อนของธรรมชาติ ซึ่งความหมายของเซลลูลาร์ออโตมาตาที่วูล์ฟเฟรมได้แสดงไว้ คือการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการสร้างจุดภาพ (pixel) เพื่อแสดงเป็นภาพบนหน้าจอคอมพิวเตอร์แทนเซลล์ที่อยู่ตามธรรมชาติ เซลล์ที่แสดงในแต่ละสถานะจะมีกฎ (rule) ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลง โดยเป็นผลที่สืบเนื่องมาจากเซลล์ของเพื่อนบ้านเมื่อสถานะที่ผ่านมานั้นเอง ด้วยเหตุนี้จึงมีกฎแบบเดียวกันสำหรับทุกเซลล์ในกริด

เงื่อนไขสำหรับเซลลูลาร์ออโตมาตาซึ่งแสดงในรูปที่ 2.10 เป็นตัวอย่างกฎที่ 254 (rule 254) ของเซลลูลาร์ออโตมาตาใน 1 มิติ ซึ่งมีทั้งหมด 8 สถานะ และแต่ละเซลล์จะมีเพียง 2 รูปแบบคือสีขาวหรือสีดำ โดยเซลล์แถวบน (top row) 3 เซลล์ คือเซลล์เพื่อนบ้านของเซลล์แถวล่าง (bottom row) สามารถแสดงรูปแบบที่แตกต่างกันได้ทั้งหมด 2^3 หรือ 8 วิธี แยกรูปแบบในแต่ละวิธีตามกล่อง (box) ที่แสดงไว้

ในทางคอมพิวเตอร์แต่ละเซลล์สามารถเขียนแทนได้ด้วยเลขฐานสองที่ประกอบด้วยบิต (Bit) 0 และ 1 โดยที่ให้ค่า 0 แทนช่องเซลล์ที่มีสีขาว ส่วนค่า 1 แทนช่องเซลล์สีดำ วิธีการอ่านชื่อกฎในรูปที่ 2.10 สามารถอ่านและเขียนได้ด้วยค่าประจำบิตของเลขฐานสองคือ $(11111110)_2$ และมีค่าเท่ากับ 254 ในเลขฐานสิบ เมื่อนำแสดงผลภาพด้วยวิธีเซลลูลาร์ออโตมาตา จะปรากฏผลลัพธ์เช่นเดียวกับรูปที่ 2.11 โดยแถวบนสุดเป็นค่าของเซลล์ในเวลาเริ่มต้น ส่วนแถวอื่นที่อยู่ด้านล่างเป็นสถานะที่สร้างขึ้นจากเซลล์ที่อยู่ด้านบนเมื่อเวลาผ่านไป

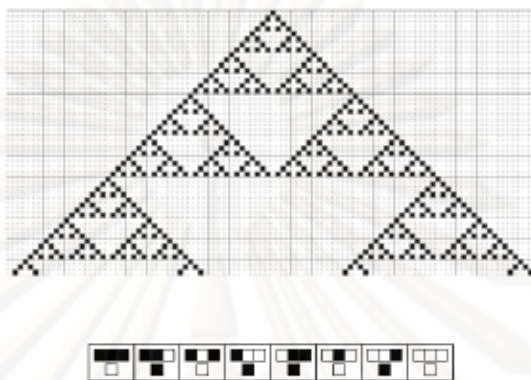


รูปที่ 2.10 ภาพตัวอย่างของสถานะที่ต่างกัน 8 สถานะของเซลลูลาร์ออโตมาตามกฎที่ 254



รูปที่ 2.11 ภาพแสดงผลของวิธีเซลล์ลาร์อโตมาตา และการเปลี่ยนสถานะตามกฎที่ 254

นอกจากนี้กฎบางกฎของเซลล์ลาร์อโตมาตาก็มีลักษณะที่ซ้ำไปซ้ำมาเช่นเดียวกับแฟร็กทัล (fractal) ตัวอย่างกฎที่ 90 ซึ่งปรากฏลักษณะเช่นเดียวกับแฟร็กทัลดังแสดงในรูปที่ 2.12 และสามารถเขียนเป็นสมการของเซลล์สถานะปัจจุบัน (a') ที่ตำแหน่ง i จากเซลล์เพื่อนบ้านในสถานะก่อนหน้า (a) ได้ว่า $a'_i = \text{Mod} [a_{i-1} + a_i + 1, 2]$



รูปที่ 2.12 ภาพของเซลล์ลาร์อโตมาตาในกฎที่ 90 ซึ่งมีลักษณะการซ้ำรูปแบบในลักษณะเดียวกับแฟร็กทัล

เนื่องจากที่เซลล์ลาร์อโตมาตาเป็นการแสดงลักษณะที่มีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติ เซลล์ลาร์อโตมาตาจึงสามารถนำไปใช้ได้กับแขนงวิชาต่าง ๆ ได้อย่างหลากหลาย เช่น ภาพพื้นผิวของสัตว์ต่าง ๆ ใบไม้ เปลือกไม้ การขดตัวของเปลือกหอยโข่งใน 3 มิติ การไหลแบบมีพลวัตของไหลและก๊าซ การเชื่อมต่อของระบบเครือข่าย การสร้างภาพที่เป็นนามธรรม การสร้างรูปร่างกลมจากสามเหลี่ยม การสร้างตัวโน้ตและเสียงเพลง เป็นต้น

2.3.2 แบบจำลองเซลล์ลาร์อโตมาตาของของไหล (Lattice Gas Automata)

การเปลี่ยนแปลงสถานะของเซลล์ลาร์อโตมาตาเกิดขึ้นได้ด้วยกฎง่าย ๆ แต่สามารถแสดงพฤติกรรมที่ซับซ้อนได้ ทำให้เซลล์ลาร์อโตมาตาถูกนำมาใช้ในการจำลองทางกายภาพ (ชีววิทยา, เคมี ฯลฯ) อาทิเช่น สร้างเป็นกฎการไหลของของไหล (fluid flow) นอกจากนี้เซลล์ลาร์อโตมาตา ยังสะดวกต่อการพัฒนาโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ทำให้งานจำลอง (simulation) จำนวนมาซึ่งประมวลผลบนคอมพิวเตอร์ ได้นำหลักการของเซลล์ลาร์อโตมาตามาพัฒนาเพื่อปรับใช้ให้เหมาะสมกับงานวิจัย

2.3.2.1 ประเภทแบบจำลองของของไหล

งานจำลองของไหล (fluid simulation) แบ่งเป็นแบบจำลองการเคลื่อนที่ของโมเลกุล (molecular dynamics), แบบจำลองอนุภาคเสมือน (pseudo-particle models) และแบบจำลองในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes) ดังแสดงการจัดกลุ่ม

ในตารางที่ 2.2 และเปรียบเทียบคุณสมบัติของแบบจำลองแต่ละแบบได้เช่นเดียวกับที่แสดงในรูปที่ 2.13

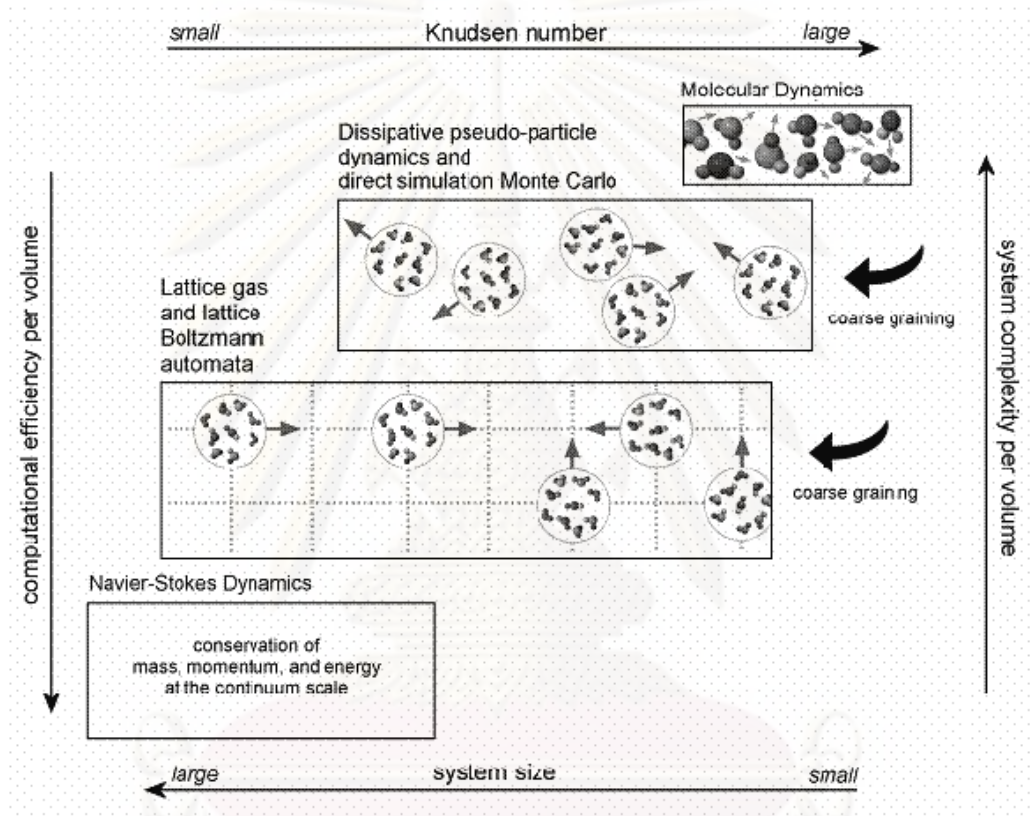
แบบจำลองอนุภาคเสมือน (pseudo-particle models) แบ่งออกเป็น 2 วิธีการใหญ่ ได้แก่ วิธีการที่ใช้แลตทิซและวิธีการที่ไม่ใช้แลตทิซ ซึ่งวิธีที่ใช้แลตทิซประกอบด้วยวิธีแก๊สแลตทิซอโตมาตา (Lattice Gas Automata) [8] และวิธีแลตทิซโบลทซ์แมนน์ (Lattice Boltzmann Automata) โดยแก๊สแลตทิซอโตมาตาถูกเรียกอีกอย่างว่าเซลล์ลูลาร์ของแก๊สแลตทิซ (Lattice Gas Cellular Automata: LGCA) เป็นแบบจำลองชนิดเต็มหน่วยที่ใช้พื้นฐานของระบบอนุภาค (particle) โดยอนุภาคจะเคลื่อนที่ไปมาบนตารางแลตทิซ วิธีการนี้เป็นวิธีการหนึ่งที่เหมาะสมและง่ายในการเลียนแบบพฤติกรรมของโมเลกุลที่เคลื่อนที่แบบพลวัต และจากการอธิบายเพิ่มเติมของชาปแมน-เอนสกอก (Chapman-Enskog) ทำให้ทราบว่าวิธีการเซลล์ลูลาร์อโตมาตาแบบแก๊สแลตทิซสามารถใช้แทนแบบจำลองของนาเวียร์-สโตกส์ได้ จึงไม่ต้องใช้สมการคำนวณที่ซับซ้อนแต่ยังสามารถเลียนแบบการเคลื่อนที่แบบพลวัตของของไหลไปพร้อมกัน ดังแสดงตัวอย่างทิศทางของอนุภาคของไหล (particle) ในกริดแบบหกเหลี่ยม (hexagonal grid) เช่นเดียวกับรูปที่ 2.14

แก๊สแลตทิซได้รับการพัฒนารูปแบบของกริดหรือแลตทิซในแบบต่าง ๆ กัน อาทิ เช่น แบบที่มี 4 ทิศทางความเร็วใน 2 มิติ หรือเรียกกันว่าเฮชพีพี (HPP) แบบที่มี 6 ทิศทางความเร็วใน 2 มิติ หรือที่เรียกกันว่าเอฟเฮชพี (FHP) ซึ่งสำหรับแบบเอฟเฮชพีนั้นได้ถูกพิสูจน์ว่าสามารถใช้ทดแทนสมการนาเวียร์-สโตกส์ได้ เนื่องจากมีการอนุรักษ์โมเมนตัมของการชน นอกจากนี้ยังมีแบบเอฟซีเฮชซีซึ่งพยายามพัฒนาจากแบบเอฟเฮชพีเพื่อเพิ่มความสะดวกในการออกแบบและเขียนโปรแกรม

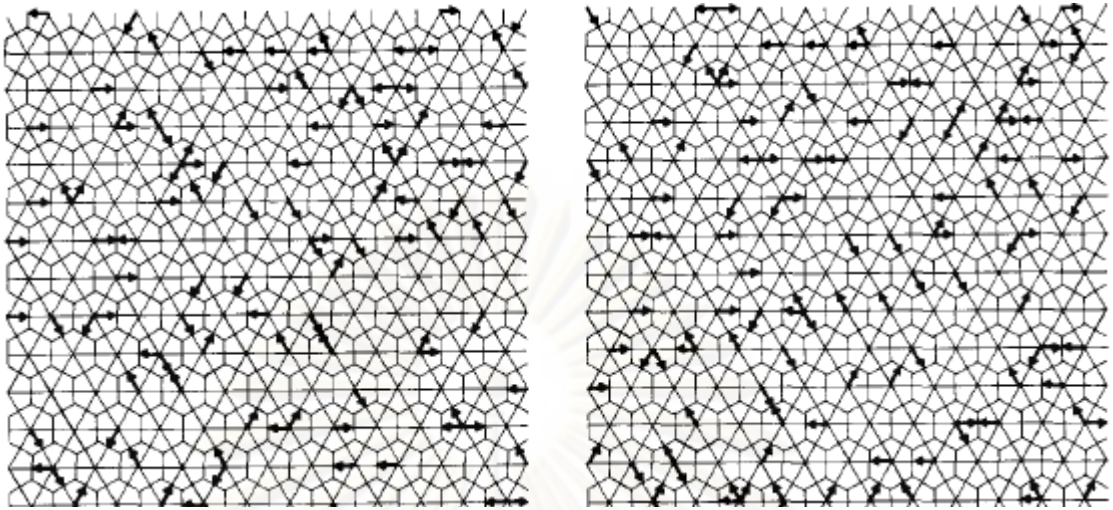
ตารางที่ 2.2 แบบจำลองของไหลในทางการคำนวณที่จำแนกรูปแบบที่แตกต่างกัน [9]

Computational fluid models		
Molecular dynamics		
Pseudo-particle models	Off-lattice models	dissipative particle dynamics
		direct simulation Monte Carlo methods
	Lattice-based models	Lattice gas automata
		Lattice Boltzmann automata
Navier-Stokes solvers		

สำหรับแลตทิซโบลทซ์แมนน์อัตโนมัติ (Lattice Boltzmann Automata) ได้ถูกพัฒนามาจากแก๊สแลตทิซอัตโนมัติร่วมกับวิธีการแลตทิซโบลทซ์แมนน์ ซึ่งทำให้สามารถแสดงลักษณะความเร็วแลตทิซได้มากกว่าเฉพาะ 0 หรือ 1 เท่านั้น ซึ่งวิธีการนี้ได้ถูกวิวัฒนาการออกไปในรูปแบบต่าง ๆ อาทิเช่น แบบ 2 มิติ ใน 9 ทิศทางความเร็ว (D2Q9) แบบ 3 มิติใน 15 ทิศทางความเร็ว (D3Q15) และแบบ 3 มิติใน 19 ทิศทางความเร็ว (D3Q19) เป็นต้น โดยมีลำดับชั้นและวิวัฒนาการของแก๊สแลตทิซอัตโนมัติอย่างคร่าว ๆ [9-10] ดังที่แสดงในหัวข้อ 2.3.2.2



รูปที่ 2.13 เปรียบเทียบตัวเลขคณูเซน (Knudsen Number), ประสิทธิภาพทางการคำนวณต่อหน่วยปริมาตร (computational efficiency per volume), ความซับซ้อนของระบบต่อหน่วยปริมาตร (system complexity per volume) และขนาดของระบบ (system size) ของแต่ละแบบจำลองของแก๊ส [9]

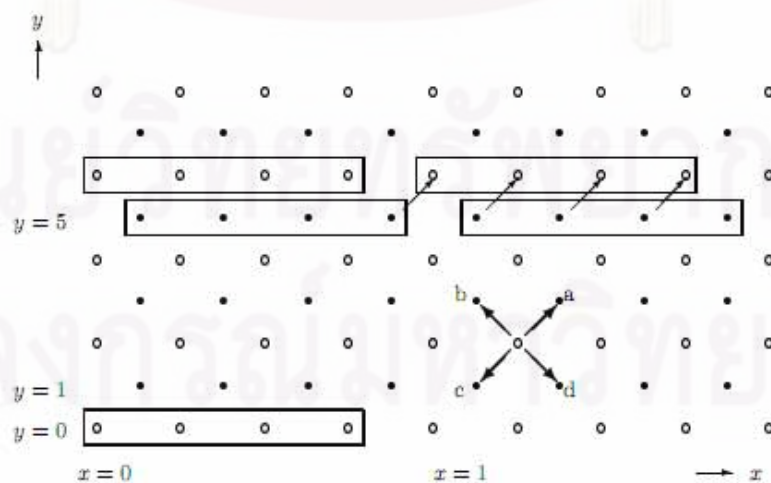


รูปที่ 2.14 ภาพของโครงแบบในแบบจำลองเซลล์ลาร์อโตมาตาของของไหล โดยลูกศรที่ปรากฏบนตารางหกเหลี่ยมชี้แทนอนุภาคแบบเต็มหน่วย

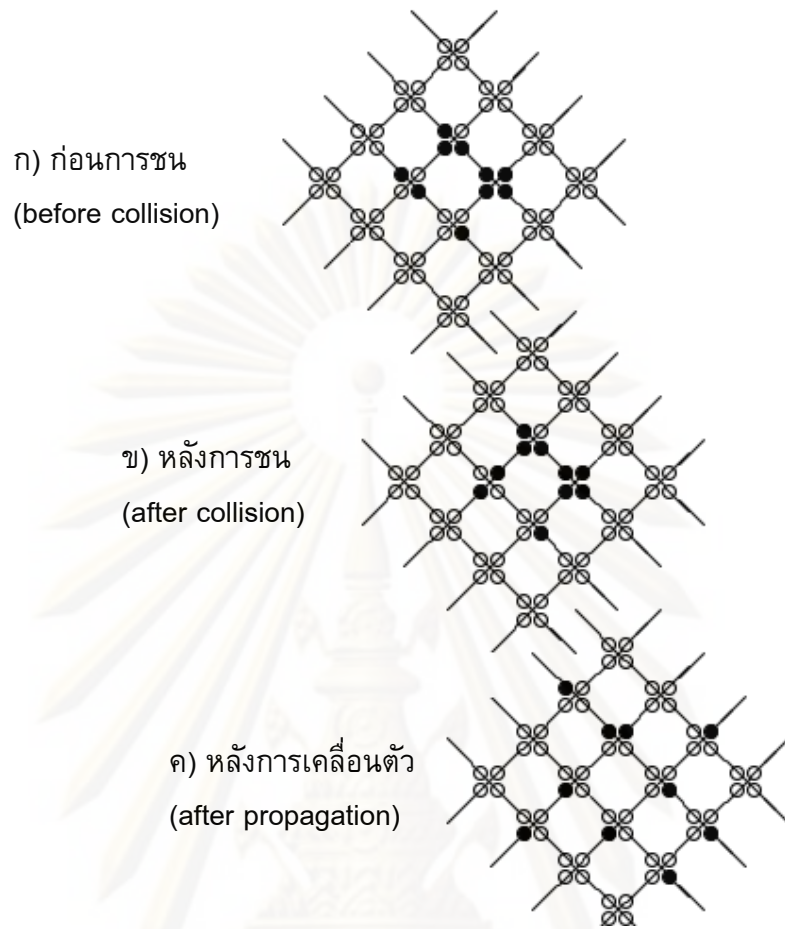
2.3.2.2 ประเภทของแลตทิซแก๊สอโตมาตา (Lattice gas automata)

- HPP-model (Hardy, Pomeau, และ Pazzis) [11-13]

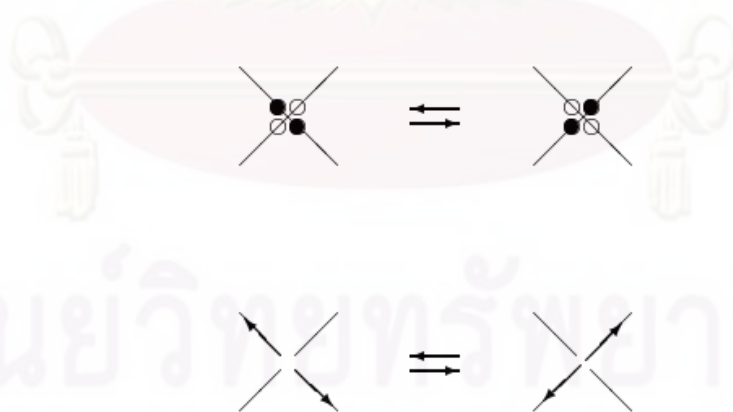
แบบจำลองชนิด HPP เป็นต้นแบบของแลตทิซแก๊สอโตมาตา (Lattice gas automaton) ซึ่งมักพูดถึงในเชิงประวัติความเป็นมาของแลตทิซแก๊ส แบบจำลองชนิดนี้จะใช้บูลีน (boolean) แทนการเปลี่ยนแปลงสถานะของอนุภาคของไหลที่อยู่บนกริด (boolean pseudo-fluid particles) โดยกริดที่ใช้เป็นกริดแบบสี่เหลี่ยมเพื่อนบ้านในระนาบสองมิติ (2D quadratic grid) มีลักษณะของกริดดังแสดงในรูปที่ 2.15 และมีการเปลี่ยนแปลงสถานะแต่ละขั้นตอนดังแสดงตัวอย่างเช่นเดียวกับรูปที่ 2.16 ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนก่อนการชน, ขั้นตอนหลังการชน และขั้นตอนการเคลื่อนตัว



รูปที่ 2.15 กริดของแลตทิซแก๊สแบบ HPP-model ซึ่งแต่ละบัพมีเพื่อนบ้านข้างเคียง 4 บัพ



รูปที่ 2.16 ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงสถานะของแลตทิซแก๊สแบบ HPP-model



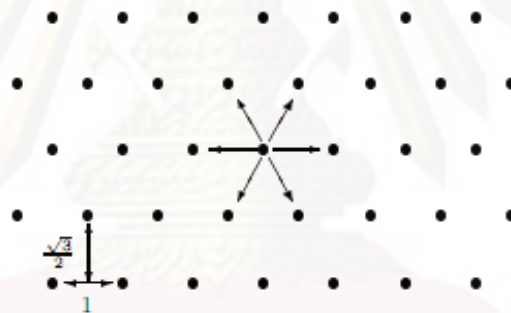
รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนทิศของอนุภาคภายในบัพเมื่อเกิดการชนโดยการสลับตำแหน่งอนุภาคในเส้นแลตทิซ (บน) และแสดงทิศทางในรูปแบบของเวกเตอร์แลตทิซ (ล่าง)

สำหรับแบบจำลอง HPP ในบัพหนึ่งบัพที่เส้นแลตทิซตัดกันจะสามารถมีอนุภาคสถิตได้ 4 อนุภาค (เท่ากับจำนวนเส้นแลตทิซ) เมื่อเกิดการชนของอนุภาคจำนวน 2 อนุภาคที่อยู่ตรงข้ามกันในบัพ จะมีกฎการเปลี่ยนทิศทางโดยจะเปลี่ยนไปยังอีกทิศทางที่ไม่มีอนุภาคสถิตอยู่ดังแสดงในรูปที่ 2.17

- *FHP-model (Frisch, Hasslacher และ Pomeau) [14]*

แบบจำลองชนิด FHP เป็นแลตทิซแก๊สสองมิติที่ใช้กริดแบบหกบัพเพื่อนบ้าน (hexagonal grid) เช่นเดียวกับตัวอย่างกริดในรูปที่ 2.18 สำหรับแลตทิซแก๊สชนิด FHP ได้ถูกวิวัฒนาการโดยแบ่งออกเป็น 3 ชนิดย่อยดังมีคุณสมบัติดังนี้

- 1) ชนิด FHP-I – มี 6 บัพเพื่อนบ้าน (neighbor node)
- 2) ชนิด FHP-II – มี 6 บัพเพื่อนบ้าน (neighbor node) และ 1 อนุภาคที่นิ่ง (rest particle)
- 3) ชนิด FHP-III – มี 6 บัพเพื่อนบ้าน (neighbor node), 1 อนุภาคที่นิ่ง (rest particle) และกฎการชนที่สมบูรณ์ (complete collision rules)



รูปที่ 2.18 กริดของแลตทิซแก๊สแบบ FHP-model

คุณสมบัติที่จำเป็นของแลตทิซแก๊สไฮโดรไดนามิกชนิด FHP ประกอบด้วย

1. กริดแบบหกบัพเพื่อนบ้านแสดงควมมีสมมาตร (symmetry)
2. บัพ (node) ซึ่งบางครั้งเรียกว่าปม (site) จะเชื่อมต่อกันด้วยเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด 6 เพื่อนบ้านเหมือนกันทุกตำแหน่ง และมีระยะทางที่ห่างจากบัพตรงกลาง (central node) เท่ากัน
3. เวกเตอร์ C_i เชื่อมต่อไปยังเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดเรียกว่าเวกเตอร์แลตทิซ (lattice vector) หรือความเร็วแลตทิซ (lattice velocity)

$$c_i = \left(\cos \frac{\pi}{3} i, \sin \frac{\pi}{3} i \right), i = 1, \dots, 6 \quad 2.2$$

ที่ $|c_i| = 1$ สำหรับทุก ๆ i

4. แต่ละเซลล์ (cell) จะเกี่ยวข้องกันด้วยการเชื่อมโยง (link) บัพทั้งหมดเข้าด้วยกัน

5. เซลล์สามารถว่าง (empty) หรือไม่ว่าง (occupied) ได้ด้วยจำนวนอนุภาค (particle) โดยมากที่สุด 1 อนุภาค

6. ทุกอนุภาคจะมีมวล (mass) เท่ากัน (เช่น กำหนดให้เป็น 1) และไม่มี ความแตกต่างจากกัน

7. วิวัฒนาการ (evolution) ในแต่ละเวลาที่กระบวนการดำเนินไป เกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงของการชน (collision) C และการเคลื่อนที่ (streaming, propagation) S

$$\mathcal{E} = C \circ S \quad 2.3$$

โดยที่ \mathcal{E} เรียกว่าตัวดำเนินการวิวัฒนาการ (evolution operator)

8. การชนจะอยู่ในวงจำกัด เช่น มีเพียงอนุภาคของหนึ่งบัพเดียวที่นำมาเกี่ยวข้อง

r เป็นเวกเตอร์ตำแหน่ง (position vector) ของบัพหนึ่งบัพ, $r + c_i$ เป็นเวกเตอร์ตำแหน่งของเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดของมัน แต่ละคู่เวกเตอร์แลตทิซ ($c_i \leftrightarrow c_j$) จะเกี่ยวข้องกันด้วยส่วนย่อย (Element) ของกลุ่มที่มีติสมมูลกันซึ่งแปลงจาก c_i ไปสู่ c_j ด้วยการหมุน 1 ครั้งของ $n \cdot 60^\circ$ ดังแสดงการหมุนในรูปที่ 2.19 และสมการโมเมนตัมสามชนิดแรกของเวกเตอร์แลตทิซ c_i อธิบายในสมการที่ 2.4, 2.5 และ 2.6 ซึ่งผลรวมในขอบเขตของ i เริ่มตั้งแต่ 1 ถึง 6

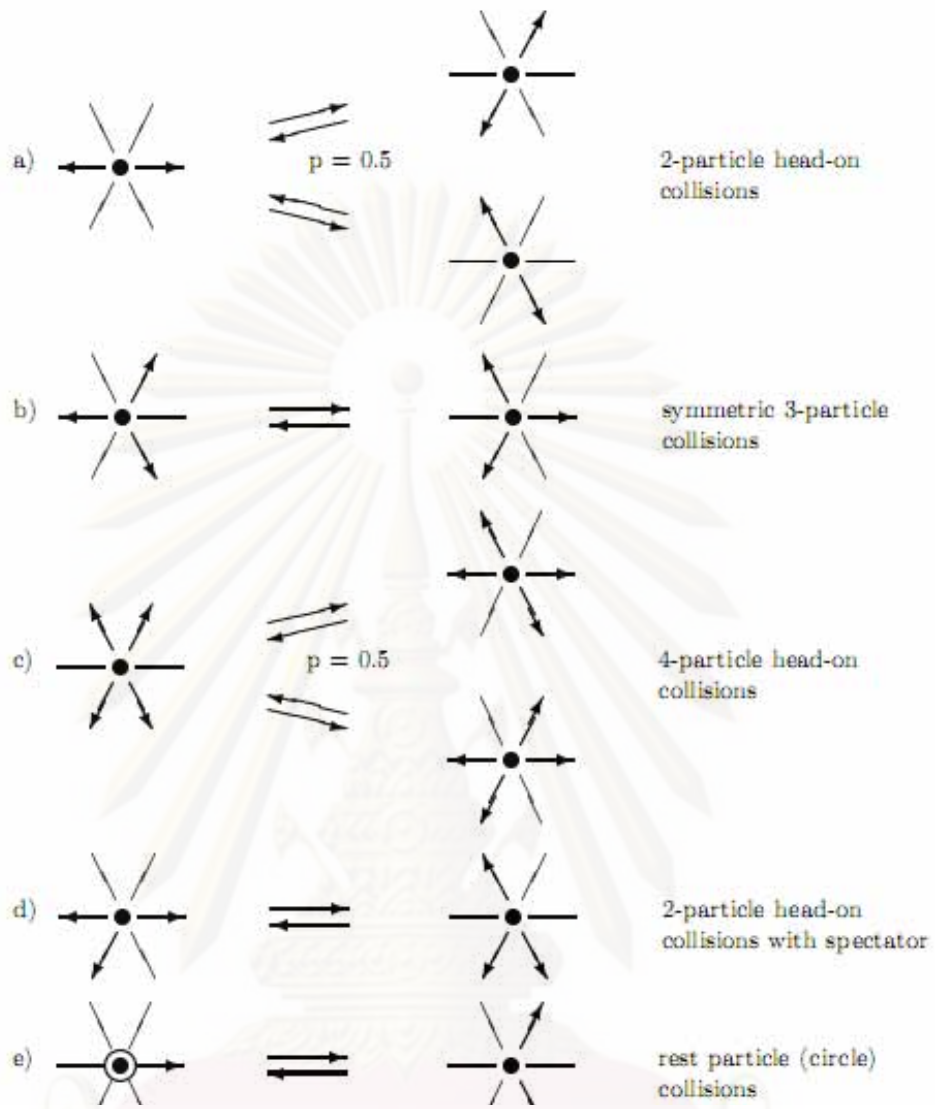
$$\sum_i c_i = 0 \quad 2.4$$

$$\sum_i c_{i\alpha} c_{i\beta} = 3\delta_{\alpha\beta} \quad 2.5$$

$$\sum_i c_{i\alpha} c_{i\beta} c_{i\gamma} = 0 \quad 2.6$$

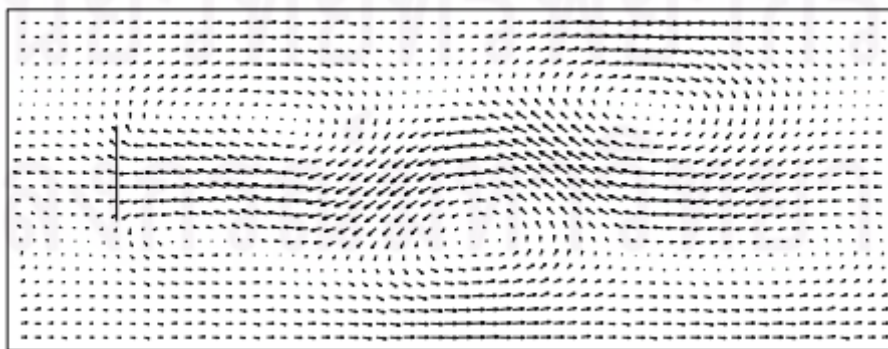
ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

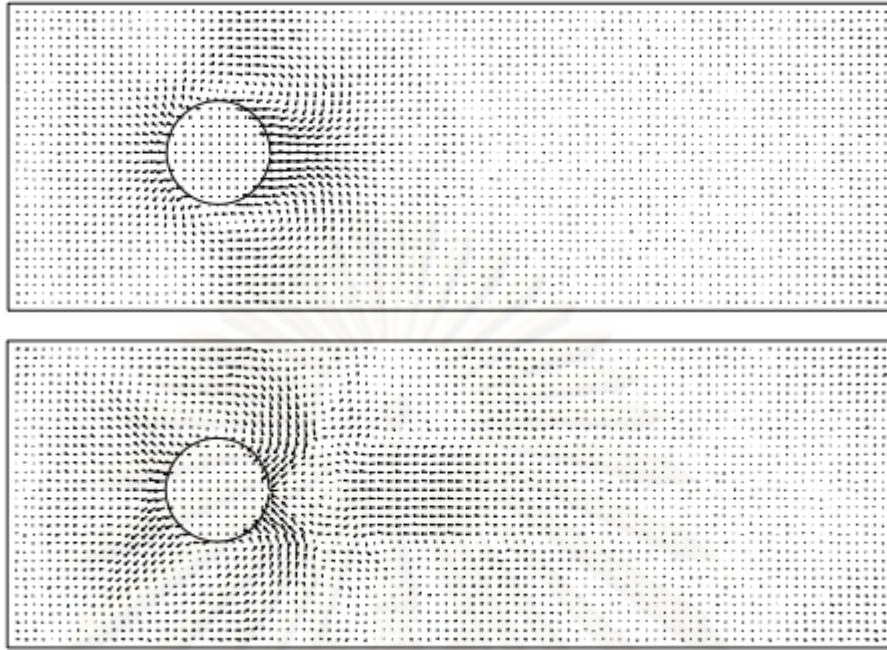


รูปที่ 2.19 สถานะก่อนการชน และหลังการชนของแลตทิซแก๊สอโตมาตาแบบ FHP [9]

สำหรับตัวอย่างของวิธีเวกเตอร์แลตทิซของวิธีแลตทิซแก๊สอโตมาตาชนิด FHP แสดงดังรูปที่ 2.20 และรูปที่ 2.21



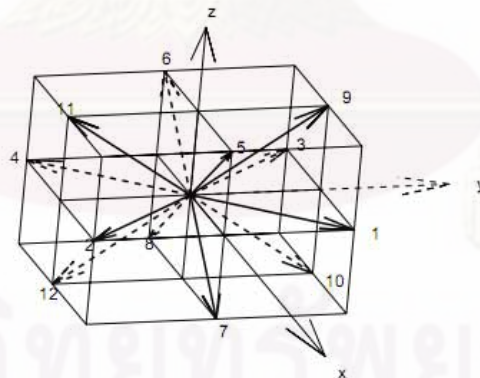
รูปที่ 2.20 ภาพตัวอย่างการแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของแลตทิซแก๊สชนิด FHP-II



รูปที่ 2.21 ภาพตัวอย่างการแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของแลตทิซแก๊สชนิด FHP-I

- *FCHC-model (face-centered-hypercubic)*

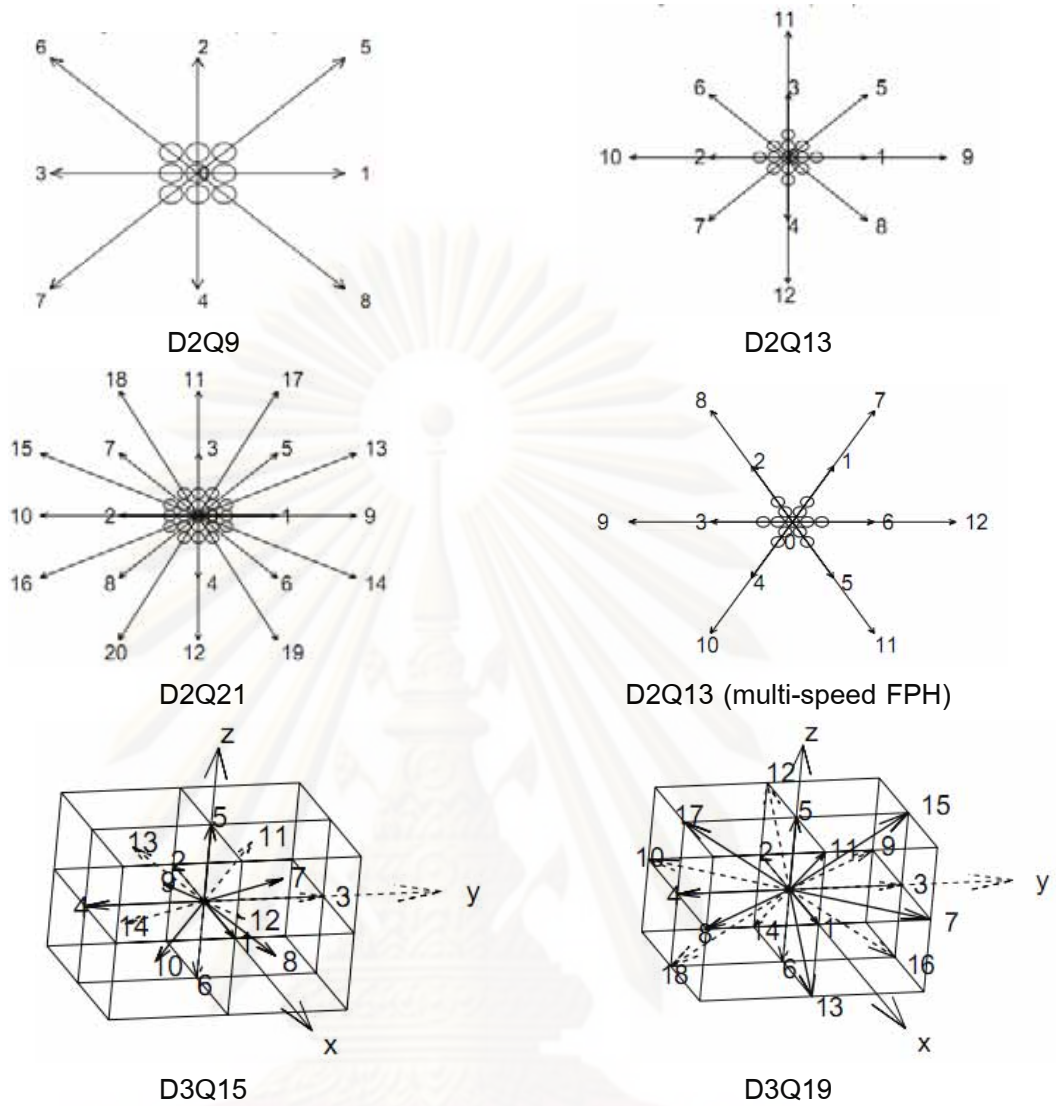
เป็นแบบจำลอง FHP ชนิดที่มีแลตทิซในสามมิติ (3D lattice gas model) โดยแลตทิซของบราวเวียสซึ่งมีสี่มิติ (4D Bravais lattice) และ 24 บัพเพื่อนบ้าน (neighbor node) จะถูกทำการฉาย (projection) ลงบนหนึ่งกริดสามมิติเชิงพื้นที่ (3D spatial lattice) โดยแสดงบัพของเพื่อนบ้านดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 กริดของแลตทิซแก๊สแบบ FCHC-model

2.3.2.3 ตัวอย่างกริดชนิดต่าง ๆ ที่สามารถใช้ในแลตทิซแก๊ส

นอกจากวิธีของแลตทิซแก๊สอโตมาดาที่ยกตัวอย่างมาในข้างต้น ก็ยังมีอีกหลายวิธีในการสร้างการเคลื่อนไหวของของไหล ทั้งใน 2 มิติ และ 3 มิติ โดยแต่ละแบบแตกต่างกันด้วยจำนวนของเพื่อนบ้าน และกฎการชนที่ตั้งขึ้น ซึ่งลักษณะกริดแบบต่าง ๆ แสดงในดังรูปที่ 2.23

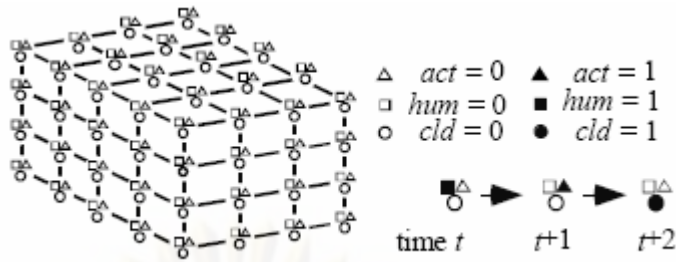


รูปที่ 2.23 ตัวอย่างกริดชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในวิธีแลตทิซแก๊สอโตมาตา

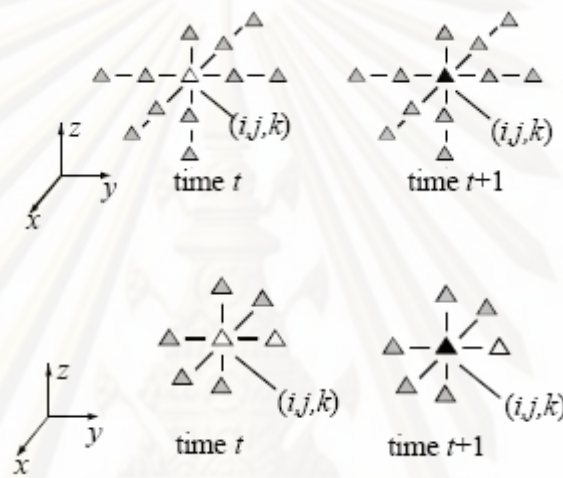
2.3.3 วิธีการเซลล์อโตมาตาเพื่อจำลองการเติบโตของหมู่เมฆ

วิธีการเซลล์อโตมาตาที่ใช้จำลองการเติบโตของหมู่เมฆของนาเกล [15] ได้สร้างกฎในการก่อตัวของเมฆ โดยกำหนดให้อนุภาคของเมฆเปลี่ยนแปลงไปได้ 3 สถานะ คือ สถานะที่เป็นไอน้ำ (vapor) สถานะที่เป็นเมฆ (cloud) และสถานะที่เปลี่ยนจากไอกลายเป็นเมฆ (phase transition from vapor to clouds) ซึ่งโดยแทนด้วยเลขฐานสอง 0 และ 1 แสดงเป็นกริดสามมิติดังรูปที่ 2.24 และการเปลี่ยนสถานะของอนุภาพเมฆในรูปที่ 2.25

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.24 ภาพของกริด 3 มิติ และเมฆแต่ละสถานะ ของวิธีการจำลองการเติบโตแบบเซลล์ลูลาร์ ออกโตมาตาของเมฆ



รูปที่ 2.25 ภาพการเปลี่ยนสถานะภาพการเติบโตของอนุภาคเมฆ และการเคลื่อนตัวตามแรงลม ในแนวนอน

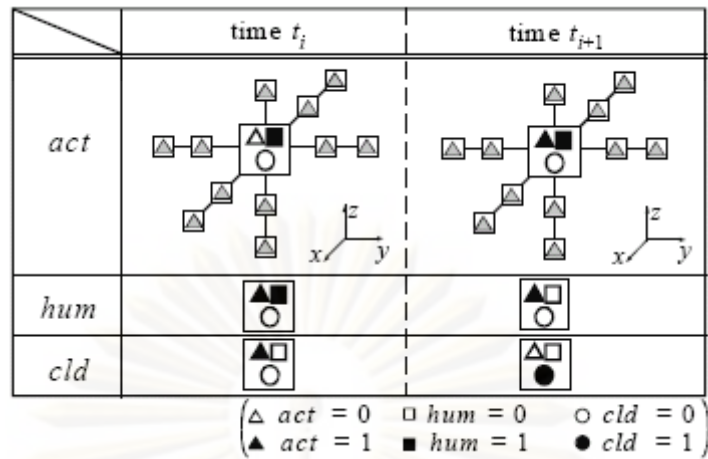
สำหรับกฎที่นำใช้กำหนดสถานะของไอน้ำ (hum) เมฆ (cld) และสถานะที่กำลังเปลี่ยนจากไอน้ำเป็นเมฆ (act) แสดงไว้ในสมการที่ 2.7, 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ โดยค่า $f(i, j, k)$ ในสมการที่ 2.9 อธิบายด้วยสมการที่ 2.10 และตัวอย่างของการเติบโตของเมฆเมื่อเวลา $t + 1$ แสดงอยู่ในรูปที่ 2.26

$$hum(i, j, k, t_{i+1}) = hum(i, j, k, t_i) \text{ and not } act(i, j, k, t_i) \tag{2.7}$$

$$cld(i, j, k, t_{i+1}) = cld(i, j, k, t_i) \text{ or } act(i, j, k, t_i) \tag{2.8}$$

$$act(i, j, k, t_{i+1}) = not \ act(i, j, k, t_i) \text{ and } hum(i, j, k, t_i) \text{ and } f(i, j, k) \tag{2.9}$$

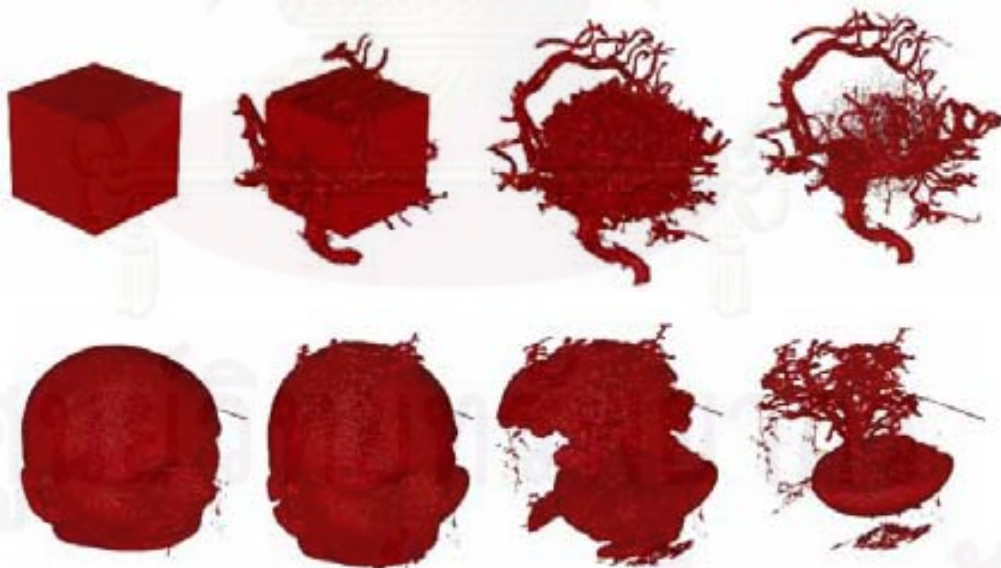
$$f(i, j, k) = act(i + 1, j, k, t_i) \text{ or } act(i, j + 1, k, t_i) \text{ or } act(i, j, k + 1, t_i) \text{ or } act(i - 1, j, k, t_i) \text{ or } act(i, j - 1, k, t_i) \text{ or } act(i, j, k - 1, t_i) \text{ or } act(i - 2, j, k, t_i) \text{ or } act(i + 2, j, k, t_i) \text{ or } act(i, j - 2, k, t_i) \text{ or } act(i, j + 2, k, t_i) \text{ or } act(i, j, k - 2, t_i) \tag{2.10}$$



รูปที่ 2.26 ตัวอย่างสถานะของเมฆเมื่อเวลา $t+1$ จากการใช้กฎการเติบโตของเมฆ

2.3.4 วิธีเซลล์ลาร์อโตมาตาสำหรับการหลอมภาพปริมาตรสามมิติ

วิธีการทางเซลล์ลาร์อโตมาตาสามารถใช้ในการหลอมภาพซึ่งมีปริมาตรในปริภูมิสามมิติได้ และสามารถใช้ได้กับรูปแบบสามมิติที่มีความซับซ้อน โดยตัวอย่างของวิธีการดังกล่าวได้แก่ ขั้นตอนวิธีคอร์-อินครีเมนต์ (core-increment algorithm) ดังแสดงผลการหลอมภาพในรูปที่ 2.27 และแบบจำลองการเติบโตของแบคทีเรีย (bacterial growth model) [16] ดังแสดงผลการหลอมภาพในรูปที่ 2.28 สำหรับรหัสเทียบของวิธีการทั้งสองจะแสดงในภาคผนวก



รูปที่ 2.27 การหลอมปริมาตรสามมิติโดยใช้ขั้นตอนวิธีคอร์-อินครีเมนต์ จากทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ไปเป็นโครงสร้างเส้นเลือดแดง (บน) และศีรษะมนุษย์ไปเป็นต้นบอนไซ (ล่าง)



รูปที่ 2.28 การหลอมปริมาตรสามมิติโดยใช้ แบบจำลองการเติบโตของแบคทีเรีย จากทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ไปเป็นโครงสร้างเส้นเลือดแดง (บน) และศีรษะมนุษย์ไปเป็นต้นบอนไซ (ล่าง)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเมฆมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ ทั้งการศึกษากายภาพของเมฆด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ และงานในเชิงคอมพิวเตอร์กราฟิกส์อาทิเช่น การจำลองภาพเมฆ การสร้างภาพเคลื่อนไหวของหมู่เมฆ การสร้างเมฆที่มีการตอบสนองกับสิ่งแวดล้อม รวมถึงงานสร้างภาพหมู่เมฆและพายุที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียม ซึ่งมีทั้งที่แสดงผลในสองมิติและสามมิติ รวมถึงงานสร้างภาพเคลื่อนไหวจากภาพถ่ายของเมฆซึ่งมีประโยชน์ต่องานที่ต้องการแสดงภาพหมู่เมฆจากข้อมูลภาพที่มีอยู่จริง เช่น การใช้งานด้านอุตุนิยมวิทยา เป็นต้น

งานวิจัยเพื่อสร้างแบบจำลองของหมู่เมฆเพื่อแสดงผลทางคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่การทำนอยส์ (noises) เพื่อสร้างภาพเมฆใน 2 มิติ [17], การใช้ภาพพื้นผิว (texture) เช่นใช้ภาพพื้นผิวของเมฆใน 2 มิติเรียงซ้อนกันเพื่อสร้างเป็นภาพพื้นผิวของเมฆใน 3 มิติ [18], การสร้างหมู่เมฆแบบเหมือนจริงโดยเซลล์ลูลาร์อัตโนมัติมาตา [1], การเสนอวิธีการจำลองหมู่เมฆที่เป็นของไหลแบบพลวัตด้วยวิธีคอปเปิลด์แมพแลตทิซ (coupled map lattice - CML) [19], สร้างการจำลองหมู่เมฆโดยพัฒนาร่วมกับหน่วยประมวลผลกราฟิกส์ (graphics processing units) เพื่อเพิ่มความเร็วในงานด้านเกม [18], การสร้างเมฆบนท้องฟ้าเพื่อใช้ในงานจำลองการบิน (fight simulation) [20], รวมถึงการให้แสงเงาแก่เมฆบนท้องฟ้า [21] ในตารางที่ 3.1 เป็นตัวอย่างงานสร้างเมฆในคอมพิวเตอร์กราฟิกส์ที่ใช้การจำลองแบบพลวัต (dynamics simulation), การจำลองแบบมาตรรังสีหรือวัดปริมาณการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (cloud radiometry simulation) และการสร้างการตอบสนองของเมฆกับสิ่งแวดล้อม (Interactivity) ที่ถูกพัฒนาขึ้นในปีต่าง ๆ ส่วนงานที่ไม่ปรากฏเครื่องหมายถูกเป็นงานการสร้างแบบจำลองของเมฆ (cloud modeling) แบบอพลวัต (static cloud) และงานให้แสงเงาเมฆ (cloud rendering)

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างงานสร้างเมฆในทางคอมพิวเตอร์กราฟิกส์จนถึงปี ค.ศ. 2003 [18]

ผู้วิจัย (ปี ค.ศ.)	เมฆแบบพลวัต (Dynamics)	เมฆแบบมาตรรังสี (Radiometry)	การตอบสนองของเมฆกับสิ่งแวดล้อม (Interactivity)
Kajiya และ Von Herzen (1984)		✓	
Gardner (1985)			
Lewis (1989)			
Nishita และคณะ (1996)		✓	

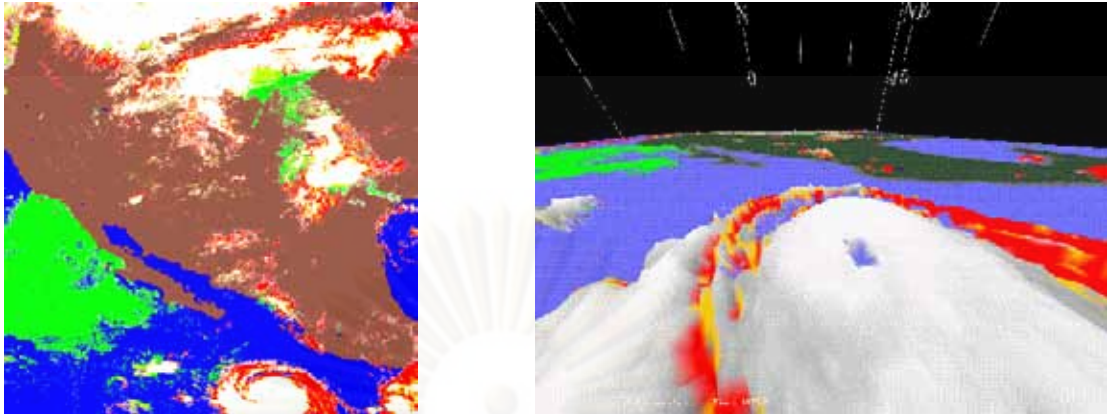
ผู้วิจัย (ปี ค.ศ.)	เมฆแบบพลวัต (Dynamics)	เมฆแบบมาตรรังสี (Radiometry)	การตอบสนองของเมฆกับสิ่งแวดล้อม (Interactivity)
Ebert (1997)	✓		
Dobashi และคณะ (2000)	✓	✓	
Elinas และ St'urzlinger (2001)			✓
Harris และ Lastra (2001)		✓	✓
Miyazaki และคณะ (2001)	✓	✓	
Overby และคณะ (2002)	✓		✓
Schpok และคณะ (2003)	✓		✓
Harris และคณะ (2003)	✓	✓	✓

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของการสร้างแบบจำลองเมฆในสามมิติจากภาพถ่ายดาวเทียมที่ผ่านมา มักใช้วิธีการทางคอมพิวเตอร์กราฟิกส์ในการสร้างปริมาตรของเมฆหรือเติมเต็มพื้นผิว ซึ่งบางวิธีมีความล่าช้าในการประมวลผลเช่นวิธีเมตะบอล ส่วนบางวิธีที่สามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็วแต่ขาดรายละเอียดของเมฆ เช่นการใช้พื้นผิว (texture) การสร้างเทอร์เรน (terrain) เป็นต้น อีกทั้งบางวิธีพิจารณาสร้างเมฆโดยให้พื้นของเมฆเท่ากันทั้งภาพ ทำให้เมฆที่สร้างจากวิธีดังกล่าวขาดความสมจริง

ในส่วนการสร้างภาพเคลื่อนไหวเมฆในสามมิติ ซึ่งนำมาใช้ในกรณีที่ภาพถ่ายของเมฆถูกบันทึกในเวลาที่ยาวกันจนขาดความต่อเนื่อง มีทั้งที่พิจารณาเวกเตอร์ทิศทางเคลื่อนที่จากข้อมูลของอนุภาคนั้นๆ จนถึงการจับคู่กลุ่มอนุภาคเมฆเพื่อสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตามสำหรับในงานที่มีเฉพาะภาพถ่ายดาวเทียมและไม่มีข้อมูลของอนุภาคนั้นๆ จะไม่สามารถคำนวณเวกเตอร์ทิศทางจากค่าของอนุภาคนั้นๆได้ ส่วนการจับคู่ของกลุ่มอนุภาคเมฆใช้ได้เฉพาะการพิจารณาเมฆที่อยู่รวมกัน ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้กับเมฆที่แยกกระจายตัวกันอยู่

3.1.1 การประมวลผลภาพถ่ายดาวเทียมแบบใกล้เคียงเวลาจริง โดยใช้การคำนวณแบบเมตะในภาษา C++ (Near-real-time Satellite Image Processing: Metacomputing in C++) [22] ปี 1996

งานวิจัยดังกล่าวเป็นงานวิจัยแรก ๆ ที่สร้างแบบจำลองเมฆในสามมิติจากภาพถ่ายดาวเทียมของเมฆ โดยงานวิจัยนี้ใช้การประมวลผลภาพถ่ายเพื่อแบ่งส่วนเมฆและพื้นดินตามระดับความสูง จากนั้นจึงสร้างพื้นผิวของเมฆขึ้นมาตามความสูงที่แบ่งส่วนได้ ดังแสดงการสร้างแบบจำลองสามมิติของเมฆในรูปที่ 3.1



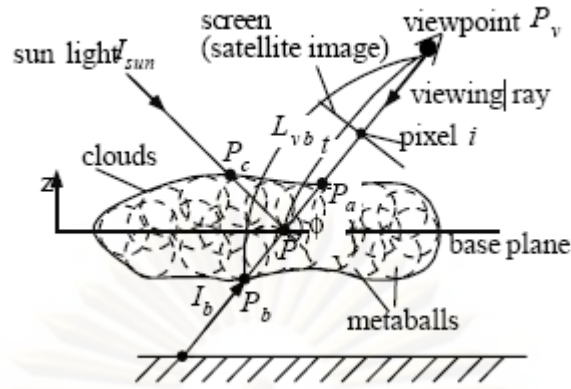
รูปที่ 3.1 ภาพเมฆสามมิติที่ (ขวา) สร้างจากภาพถ่ายดาวเทียมสองมิติ (ซ้าย)

อย่างไรก็ดีแม้การสร้างภาพสามมิติด้วยวิธีการดังกล่าวจะมีความรวดเร็ว แต่คุณภาพของผลที่แสดงยังมีรายละเอียดไม่มากนัก เนื่องจากการยกเมฆขึ้นให้ถึงระดับความสูงที่กำหนด ซึ่งก็ทำให้พื้นของเมฆที่สร้างอยู่ในระดับเดียวกันทั้งหมด ในงานวิจัยนี้ไม่ได้พัฒนาส่วนการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆ ฉะนั้นการสร้างภาพเคลื่อนไหวในกรณีดังกล่าวจึงใช้ได้เฉพาะการเรียงต่อภาพเฟรมหลักเท่านั้น

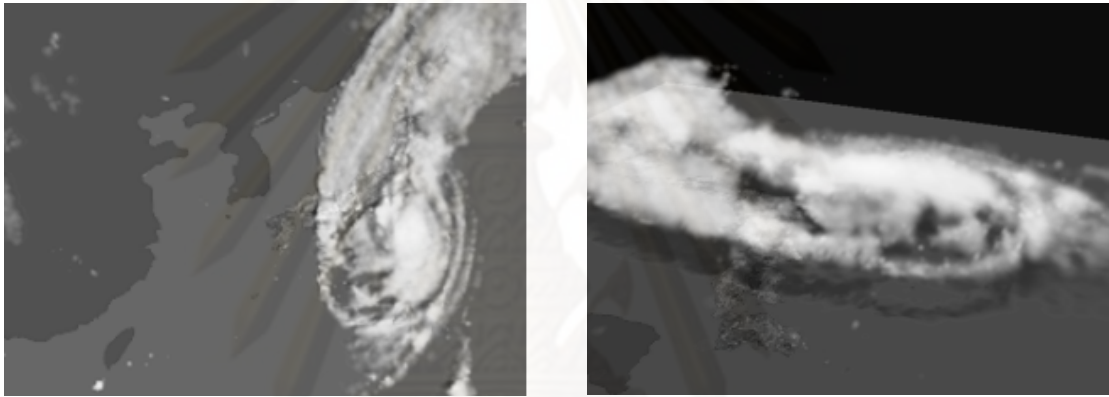
3.1.1 การสร้างแบบจำลองเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียมโดยใช้เมตะบอล (Modeling of Clouds from Satellite Images Using Metaballs) โดยโดบาชิ และคณะ [1] ปี 1998-1999

งานวิจัยนี้สามารถสร้างภาพสามมิติของเมฆโดยใช้เมตะบอลมาสร้างขึ้นบนภาพถ่ายดาวเทียม (image-based modeling) ซึ่งทำการบรรจุเมตะบอลจำนวนหนึ่งให้เป็นปริมาตรของเมฆ ตามที่แสดงองค์ประกอบของเมฆจากเมตะบอลในรูปที่ 3.5 ทั้งนี้การใช้เมตะบอลก็เพื่อกระจายความหนาแน่นของเมฆ แต่ต้องมีตัวแปรหลายอย่างในการสร้างเมตะบอล เช่น ตำแหน่งจุดศูนย์กลางเมฆที่ใช้กำเนิดเมตะบอล รัศมีของเมตะบอล ค่าความหนาแน่น จึงทำให้แบบจำลองของเมฆสามมิติโดยการใช้เมตะบอลมีความซับซ้อน ตัวอย่างแบบจำลองภาพสามมิติของเมฆภาพด้วยวิธีเมตะบอลแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งใช้จำนวนเมตะบอล 8506 เมตะบอลคำนวณในเวลา 13 วินาทีด้วยหน่วยประมวลผลที่มีความเร็ว 195 เมกกะเฮิร์ต

อย่างไรก็ดีภาพสามมิติของเมฆที่ได้จากวิธีการเมตะบอลจะมีความสมมาตรระหว่างเมฆส่วนบนและส่วนล่างของระนาบแนวนอน เนื่องจากเมตะบอลถูกสร้างและเติมเต็มขึ้นมาจากกึ่งกลางของระนาบ



รูปที่ 3.2 ภาพแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียมโดยใช้เมตตะบอล



รูปที่ 3.3 ภาพสามมิติของเมฆด้วยวิธีการเมตตะบอล

สำหรับตัวอย่างการสร้างภาพเคลื่อนไหวจะใช้การหลอมภาพ (morphing) โดยจับเมตตะบอลของภาพต้นทาง (เฟรมแรก) กับเมตตะบอลที่ใกล้ที่สุดของภาพปลายทาง (เฟรมสุดท้าย) โดยเส้นทางในการเคลื่อนที่นั้น ผู้ใช้จะเป็นผู้สังเกตแนวโน้มการเคลื่อนที่ของเมฆจากลำดับภาพถ่ายดาวเทียมที่มีอยู่ แล้วกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ให้กับเมฆ นอกจากนี้ได้พิจารณาว่าเมฆมีการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง, สลายตัว และปรากฏ ซึ่งหากสามารถเมตตะบอลใดที่สามารถจับคู่ของภาพต้นทางและภาพปลายทางได้ กลุ่มเมฆที่บรรจุเมตตะบอลนั้นก็เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ แต่หากที่ภาพต้นทางมีเมตตะบอลซึ่งไม่มีคู่ที่ปลายทางก็กำหนดให้กลุ่มเมฆที่บรรจุเมตตะบอลนั้นค่อย ๆ เลื่อนหายไปขณะเคลื่อนที่ ส่วนที่ภาพปลายทางมีเมตตะบอลซึ่งไม่มีคู่ในภาพต้นทางก็จะให้ค่อย ๆ ปรากฏขึ้นมาเช่นกัน โดยการเลื่อนหาย หรือปรากฏขึ้นมานั้นได้ใช้หลักการประมาณค่าช่วง (interpolation) ของวิธีเส้นโค้งแบบเบซีเออร์ (bezier)

ขั้นตอนการจัดคู่เมตตะบอลของภาพต้นทางกับภาพปลายทางนั้น เหมาะสมเฉพาะกับกรณีที่มีกลุ่มของเมฆที่รวมตัวกัน เช่นในการสังเกตพายุลูกใดลูกหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากการพิจารณาจับคู่เมตตะบอลมีข้อจำกัดหากการเคลื่อนที่ของเมฆส่วนใดส่วนหนึ่งมีความผิดแผก

ไปจากกลุ่มหลัก เพราะการจับคู่ที่มีประสิทธิภาพควรจับคู่เมฆในกลุ่มที่เคลื่อนไปทางเดียวกัน และสำหรับวิธีประมาณค่าช่วงทางการประมวลผลภาพถ่าย ที่นำมาใช้กับเมฆบอลลที่ไม่ถูกจับคู่ จะทำให้เมฆส่วนที่จางหายหรือปรากฏขึ้นใหม่นั้น มีการปรับเปลี่ยนค่าด้วยการคำนวณที่ คล้ายคลึงกัน ซึ่งทำให้เมฆบางส่วนมีลักษณะเลื่อนขึ้นหรือลงพร้อมกันได้ ซึ่งหากจะปรับปรุง วิธีการเพื่อให้จุดแต่ละจุดมีการเคลื่อนที่ต่างกัน ก็ต้องเพิ่มการคำนวณที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

3.1.2 งานวิจัยการสร้างภาพเคลื่อนไหวของหมู่เมฆโดยใช้เซลลูลาร์ออโตมาตา (Animation of Clouds Using Cellular Automaton) โดย โดบาชิ และ คณะ [23] ปี 1999

งานวิจัยดังกล่าวเป็นงานจำลองการเคลื่อนไหวของเมฆโดยนำวิธีการจำลอง การเติบโตของหมู่เมฆด้วยวิธีการเซลลูลาร์ออโตมาตา [15] ที่ได้กล่าวไว้ในส่วนของทฤษฎี หัวข้อที่ 2.3.3 มาใช้ร่วมกับการเรนเดอร์เมฆด้วยวิธีเมตะบอล (Metaball) เพื่อให้การเคลื่อนไหว ของเมฆแบบมีพลวัต ซึ่งได้เสนอวิธีการคำนวณการกระจายของความหนาแน่นแบบต่อเนื่อง เพื่อใช้กระจายความหนาแน่นของเมตะบอลที่สร้างขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 3.1 และ 3.2 ใน หัวข้อย่อยที่ 3.1.2.1

3.1.2.1 การคำนวณการกระจายตัวของความหนาแน่นแบบต่อเนื่อง (calculation of continuous density distribution)

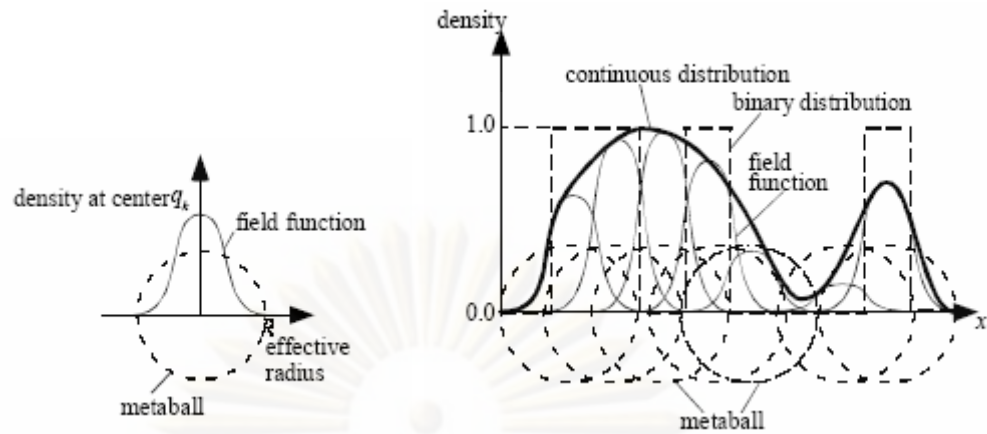
ค่าความหนาแน่น q ที่ตรงกลางของเมตะบอลแต่ละอันที่ตำแหน่ง (i, j, k) คำนวณตามสมการ $q_{i,j,k}$

$$q_{i,j,k} = \frac{1}{n_c} \times \sum_{l,m,n \in \Omega(\mathbf{x}_{i,m,n})}^{n_c} cld(\mathbf{x}_{l,m,n}) \quad 3.1$$

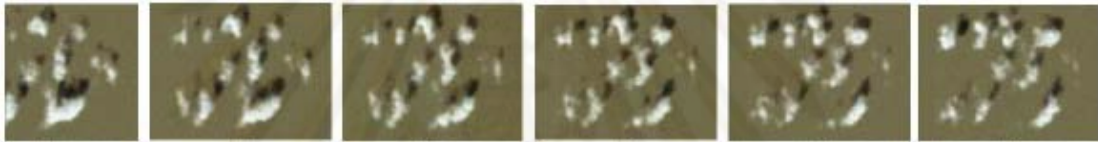
โดย cld เป็นการกระจายตัวเชิงทวิภาค และ $\mathbf{x}_{l,m,n}$ เป็นพิกัด (coordinate) ของตารางกริด ส่วน $\Omega(\mathbf{x}_{i,m,n})$ แสดงเซตของกริด

$$p(x) = \sum_{i,j,k \in \Omega(x)}^N q_{i,j,k} (|x - \mathbf{x}_{i,j,k}|) \quad 3.2$$

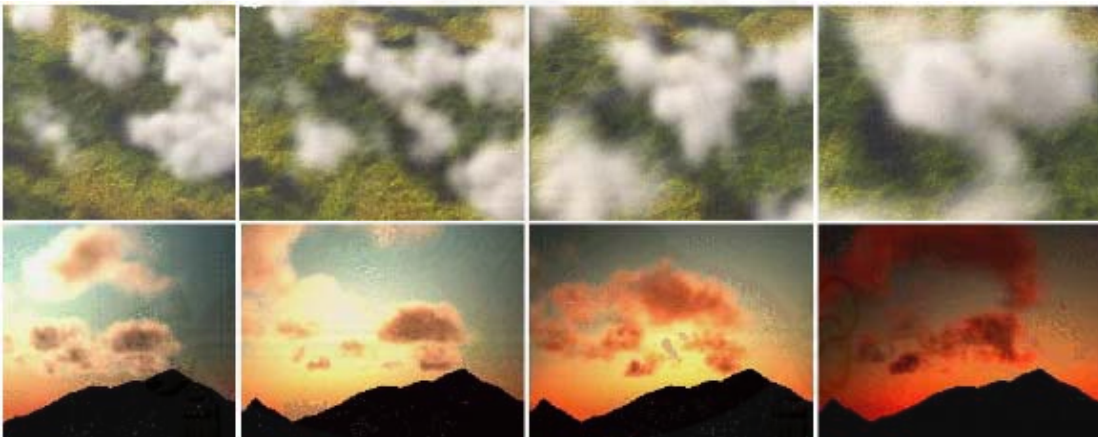
งานวิจัยดังกล่าวซึ่งแสดงผลภาพเคลื่อนไหวในรูปที่ 3.5 เป็นการจำลองหมู่เมฆจาก แบบจำลองที่สร้างขึ้นเองโดยการประมาณภาพเมฆให้เสมือนภาพหมู่เมฆจริงในลักษณะสีและ แสงเงาซึ่งไม่ได้เป็นข้อมูลที่มีอยู่จริง และใช้เมตะบอลจำนวนมากจึงทำให้ค่อนข้างใช้เวลาในการ เรนเดอร์ภาพ นอกจากนี้เซลลูลาร์ออโตมาตาที่นำมาใช้ก็เป็นเซลลูลาร์ของการจำลองการเติบโต ของหมู่เมฆ จึงไม่สามารถนำมาใช้เพื่อบังคับให้เมฆมีลักษณะตามต้องการได้



รูปที่ 3.4 ภาพอธิบายลักษณะของเมตะบอล และภาพวิธีการนำเมตะบอลมาคำนวณการกระจายตัวแบบต่อเนื่องเพื่อใช้ในการสร้างเมฆ



(ก) ตัวอย่างภาพเคลื่อนไหวของเมฆ



(ข) ตัวอย่างภาพเคลื่อนไหวของเมฆบนฉากธรรมชาติ

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างภาพที่เรนเดอร์จากงานวิจัยการสร้างภาพเคลื่อนไหวของหมู่เมฆโดยใช้วิธีการเซลล์ลาร์อโตมาตา

3.1.3 วิธีการที่มีประสิทธิภาพสำหรับการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆแบบเสมือนจริง (A Simple, Efficient Method for Realistic Animation of Clouds) โดย โดบาชิและคณะ [24] ปี 2000

งานวิจัยนี้ปรับปรุงงานวิจัยงานวิจัยการสร้างภาพเคลื่อนไหวของหมู่เมฆโดยใช้เซลล์ลาร์อโตมาตา [23] โดยได้เพิ่มการพิจารณาอีก 4 ประเด็นจากวิธีการเซลล์ลาร์อโตมาตาเพื่อจำลองการเติบโตของหมู่เมฆของนิเกล [15] เช่นเดียวกับที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่

2.3.3 ซึ่งส่วนที่เพิ่มเติมมาได้แก่ ขั้นตอนการสลายตัวของเมฆ (extinction of clouds), การกำหนดทิศทางของลม (advection by wind), การเพิ่มขึ้นของความเร็วขณะจำลองตัว (increased simulation speed) และการควบคุมการเคลื่อนตัวของเมฆ (control of cloud motion) นอกจากนี้งานวิจัยดังกล่าวได้พัฒนาส่วนของการเรนเดอร์ภาพ โดยมีตัวอย่างกฎการเปลี่ยนแปลงสถานะในแต่ละขั้นตอนดังสมการที่ 3.3 - 3.10

3.1.3.1 การคำนวณการสลายตัวของเมฆ (extinction of clouds)

$$cld(i, j, k, t_{i+1}) = cld(i, j, k, t_i) \text{ and } Is(rnd > p_{ext}(i, j, k, t_i)) \quad 3.3$$

$$hum(i, j, k, t_{i+1}) = hum(i, j, k, t_i) \text{ or } Is(rnd < p_{hum}(i, j, k, t_i)) \quad 3.4$$

$$act(i, j, k, t_{i+1}) = act(i, j, k, t_i) \text{ or } Is(rnd < p_{act}(i, j, k, t_i)) \quad 3.5$$

จากสมการตัวแปร rnd จะถูกระบบสุ่มเพื่อแทนสถานะความเป็นเมฆ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1, p_{ext} แทนค่าความน่าจะเป็นในการสลายตัวของเมฆ, p_{hum} แทนค่าความน่าจะเป็นในการแสดงตัวเป็นไอน้ำ และ p_{act} แทนค่าความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะเป็นเมฆ ซึ่งค่าของ p_{ext} , p_{hum} และ p_{act} จะกำหนดโดยเอนิเมเตอร์ และเงื่อนไข (condition) ภายในฟังก์ชัน $Is(-)$ จะส่งผลต่อสถานะของเมฆแต่ละตำแหน่งในเวลาถัดไปดังที่แสดงในสมการ

3.1.3.2 การคำนวณทิศทางของลม (advection by wind)

$$hum(z_k, k, t_{i+1}) = \begin{cases} hum(i - v(z_k), j, k, t_i) & ; i - v(z_k) > 0 \\ 0 & ; otherwise \end{cases} \quad 3.6$$

$$cld(i, j, k, t_{i+1}) = \begin{cases} cld(i - v(z_k), j, k, t_i) & ; i - v(z_k) > 0 \\ 0 & ; otherwise \end{cases} \quad 3.7$$

$$act(i, j, k, t_{i+1}) = \begin{cases} act(i - v(z_k), j, k, t_i) & ; i - v(z_k) > 0 \\ 0 & ; otherwise \end{cases} \quad 3.8$$

จากสมการ $v(z_k)$ คือฟังก์ชันที่รับค่าระดับความสูงของชั้นเมฆ z_k ในแต่ละตำแหน่ง (i, j, k) และให้ค่ากลับมาเป็นจำนวนเต็ม (integer) เพื่อใช้ในสมการโดยแทนทิศทางที่เมฆแต่ละตำแหน่งเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วลม

3.1.3.3 การคำนวณการกระจายตัวของความหนาแน่น

$$q(i, j, k, t_i) = \frac{1}{(2t_0 + 1)(2k_0 + 1)(2j_0 + 1)(2i_0 + 1)} \sum_{t'=-t_0}^{t_0} \sum_{k'=-k_0}^{k_0} \sum_{j'=-j_0}^{j_0} \sum_{i'=-i_0}^{i_0} w(i', j', k', t') cld(i + i', j + j', k + k', t_i + t') \quad 3.9$$

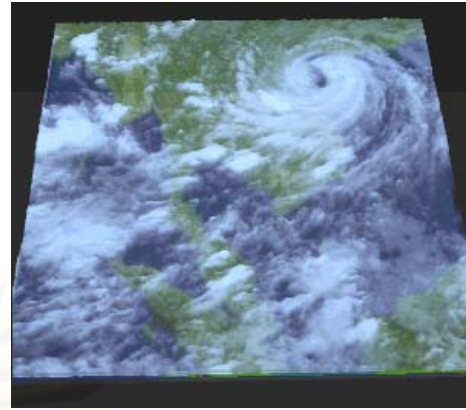
$$\rho(\mathbf{x}, t_i) = \sum_{i, j, k \in \Omega(\mathbf{x}, R)}^N q(i, j, k, t_i) f(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{i, j, k}|) \quad 3.10$$

ในแต่ละตำแหน่งของเมฆ (i, j, k, t_i) จะมีค่า 1 หรือ 0 ซึ่งจะทำให้การคำนวณค่าความหนาแน่นของเมฆแต่ละตำแหน่ง $q(i, j, k, t_i)$ ด้วยสมการที่ 3.9 โดย w เป็นฟังก์ชันน้ำหนัก และ t_0, i_0, j_0, k_0 เป็นค่าของขนาดของความละเอียด (smoothing) ที่แต่ละตำแหน่งเพื่อนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นดังแสดงในสมการ สำหรับ x ในสมการที่ 3.10 เป็นตำแหน่งที่แทนในการแสดงผลภาพเคลื่อนไหวสามมิติของเมฆ (arbitrary point) มี R เป็นผลเกี่ยวเนื่องจากรัศมีของเมฆแต่ละบอล, $\Omega(x, R)$ เป็นเซตของเซลล์ที่ส่วนตรงกลางภายในระยะรัศมี R จากจุด x และ N เป็นจำนวนสมาชิกของ $\Omega(x, R)$ โดยฟังก์ชัน f คำนวณเช่นเดียวกับสมการที่ 2.10

การปรับปรุงกระบวนการและเพิ่มเติมขั้นตอนจากวิธีการในหัวข้องานวิจัยที่ 3.1.2 ทำให้การเคลื่อนไหวของเมฆดังกล่าวมีความสมจริงมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้เป็นตัวอย่างของการใช้วิธีทางเซลล์ลูลาร์อัตโนมัติมาตาเพื่อการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆ ซึ่งมีขั้นตอนการเปลี่ยนสถานะของเมฆจากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเมฆที่ปรากฏให้เห็นได้ตามธรรมชาติ

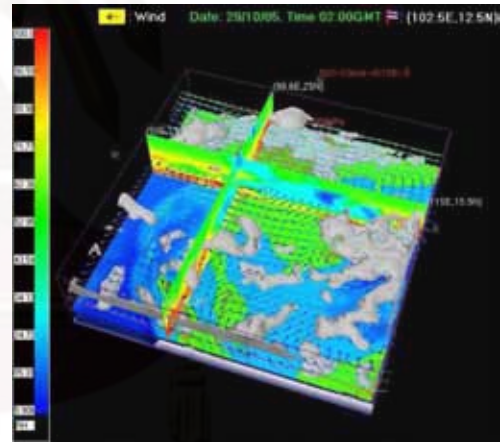
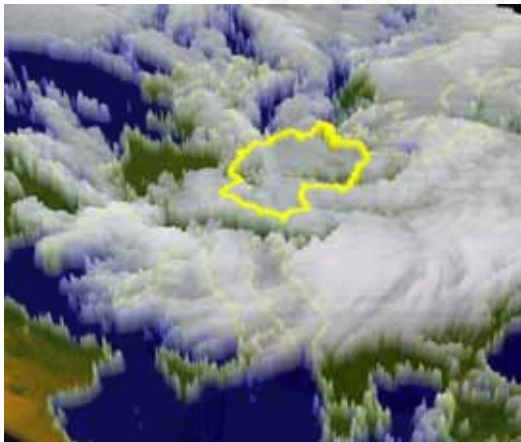
3.1.4 งานสร้างเมฆและพายุใน 3 มิติ จากภาพถ่ายดาวเทียม 2 มิติ (3D Cloud and Storm Reconstruction from Satellite Image) โดยสมพร ช่วยอารีย์ และคณะ [25] ปี 2003 และ 2006

งานวิจัยนี้ได้นำภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณทวีปเอเชียที่สร้างทุกชั่วโมงจากมหาวิทยาลัยโคจิ ประเทศญี่ปุ่น [26] ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.6 (ซ้าย) เพื่อสร้างเป็นภาพสามมิติของเมฆดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ขวา) โดยงานดังกล่าวมีจุดประสงค์ในการหาวิธีสร้างเมฆและพายุจากภาพถ่ายดาวเทียมที่เป็น 2 มิติ ให้กลายเป็น 3 มิติที่มีปริมาตรเพื่อใช้ประโยชน์ในระบบเตือนภัย ซึ่งสำหรับการแบ่งส่วนภาพย่อย (segmentation) ได้ใช้ 2 วิธีการ โดยวิธีการแรกทำการกำหนดตัวแปรซึ่งใช้ความแตกต่างของค่าสี (color Difference Value) และ ค่าสีของเมฆ (cloud color value) ส่วนวิธีการที่ 2 ได้ใช้ฮิสโตแกรมของความยาวเกรเดียนต์ (histogram of gradient length) และความเข้มของพลังงาน (intensity) ซึ่งทั้ง 2 วิธีแสดงโดยใช้ข้อมูล Etopo2 และในการกำหนดส่วนความสูง (visual Height) โดยจะให้ผู้ใช้เป็นผู้กำหนดเอง วิธีการเหล่านี้สามารถนำไปใช้ได้ทั้งภาพถ่ายดาวเทียมที่เป็นภาพสี หรือภาพถ่ายดาวเทียมที่เป็นภาพขาวดำก็ได้ ซึ่งผลที่ได้ถูกแสดงด้วยโปรแกรมแสดงสภาพอากาศสามมิติแบบเสมือน (virtual weather 3D) [25] ภาพที่ได้ดังกล่าวเป็นการวางพื้นผิวของภาพ (texture) เรียงกันตามค่าอัลฟา (alpha) และแสดงผลตามที่ผู้ใช้กำหนด ตัวอย่างผลภาพสามมิติของเมฆที่ขยายด้านข้างดังรูปที่ 3.7 (ซ้าย)



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายดาวเทียมจากมหาวิทยาลัยโคจิ ประเทศญี่ปุ่น (ซ้าย) และภาพที่แสดงเมฆและพายุในสามมิติจากภาพถ่ายดาวเทียม (ขวา)

นอกจากนี้งานวิจัยดังกล่าวได้จัดทำส่วนแสดงผลที่อ้างอิงกับอุณหภูมิเพื่อสร้างความสูงของเมฆตามอุณหภูมิดังภาพที่แสดงในรูปที่ 3.7 (ขวา) แต่อย่างไรก็ตามผลการแสดงภาพสามมิติยังมีรายละเอียดของเมฆไม่ชัดเจนในทั้งสองกรณี คือมีลักษณะเป็นก้อนสำหรับแบบนำอุณหภูมิมาใช้สร้างเมฆ และขอบของเมฆตัดตรงสำหรับแบบที่นำภาพถ่ายมาแบ่งส่วนเนื่องจากวิธีการดังกล่าวพิจารณาพื้นของเมฆ (cloud bottom) เท่ากันทุกพื้นที่

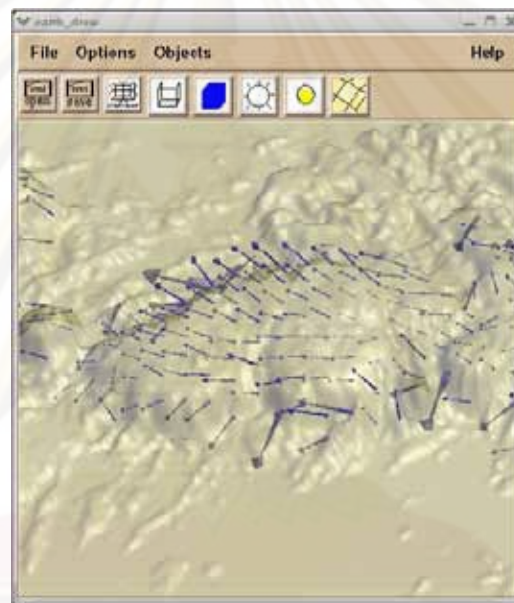


รูปที่ 3.7 ภาพการแสดงผลสามมิติของเมฆด้วยโปรแกรม Virtual Weather 3D (ซ้าย) และโปรแกรมสภาพอากาศสามมิติแบบเสมือน (ขวา)

นอกจากนี้ในส่วนการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆงานวิจัยนี้ ได้ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่มีที่อยู่มาสร้างเป็นภาพสามมิติแล้วเรียงต่อเนื่องกัน โดยไม่ได้สร้างภาพตรงกลางขึ้นมาเพิ่มเติม

3.1.5 โปรแกรมแสดงโครงสร้างสามมิติของเมฆในชั้นบรรยากาศ โดยใช้การประมวลผลและสร้างมโนภาพ (3-D Atmospheric Cloud Structures: Processing and Visualization tools) โดย Alvarez L และคณะ [27] ปี 2006

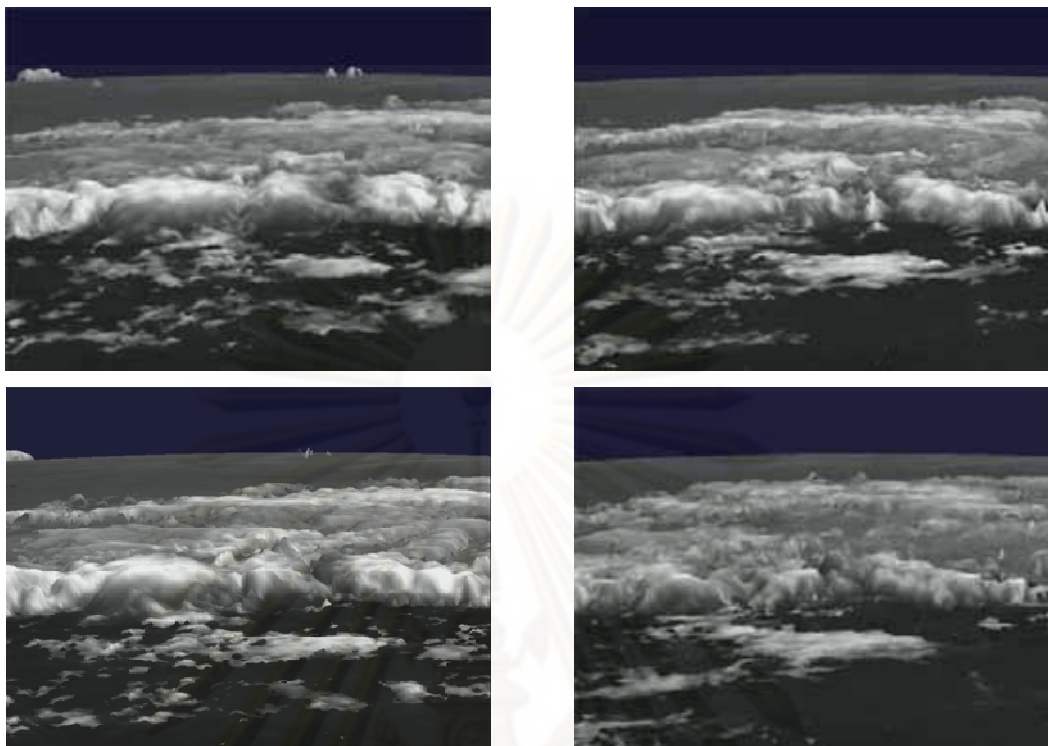
งานวิจัยดังกล่าวใช้เทคนิคออปติกคอลลีฟลูว์ (optical flow) ในการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆในสามมิติ ซึ่งสามารถทำให้เมฆเคลื่อนที่ให้เห็นหน้าและถอยหลังได้ตามเวกเตอร์ที่กำหนดขึ้นโดยแสดงตัวอย่างของเวกเตอร์ที่สร้างขึ้นในรูปที่ 3.8 แต่กระบวนการออปติกคอลลีฟลูว์นี้ จะต้องมีค่าของอนุภูมิของแต่ละตำแหน่งในภาพถ่ายดาวเทียมเพิ่มเติม ทำให้หากมีเฉพาะภาพถ่ายดาวเทียมก็ไม่สามารถคำนวณเวกเตอร์ของทิศทางการเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 3.8 หน้าต่างตัวอย่างของโปรแกรมแสดงโครงสร้างสามมิติของเมฆในชั้นบรรยากาศ

สำหรับส่วนการสร้างภาพสามมิติของเมฆในงานวิจัยดังกล่าวพิจารณาการสร้างเมฆในมิติแนวตั้งด้วยการยกระดับเมฆขึ้นจากระดับเดียวกัน ทำให้ผลแสดงภาพสามมิติของเมฆด้านล่างสุดอยู่ในระดับของพื้น แสดงผลภาพสามมิติตามลำดับที่เคลื่อนไหวด้วยวิธีออปติกคอลลีฟลูว์ในรูปที่ 3.9

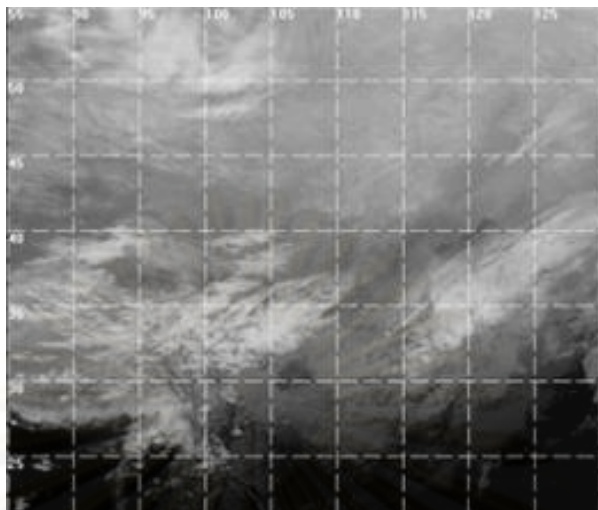
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



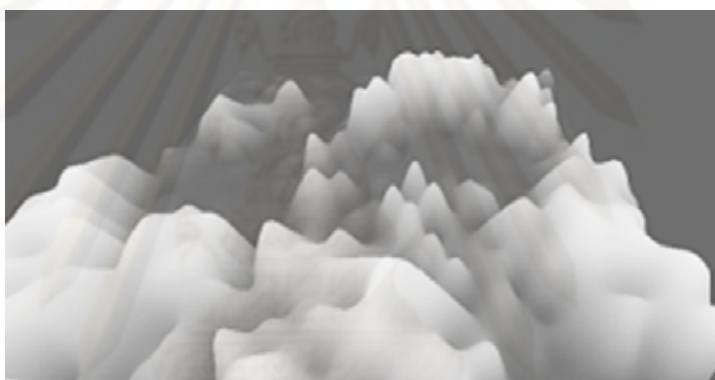
รูปที่ 3.9 ผลการแสดงผลภาพสามมิติของโปรแกรมในแต่ละเฟรมของวิธีการ 3-D Atmospheric Cloud Structures

3.1.6 เทคโนโลยีแอปพลิเคชันสำหรับภาพถ่ายดาวเทียมสามมิติของเมฆในโปรแกรมจำลองเวอร์ชวลเรียลลิตี้ (The Application of the Technology of 3D Satellite Cloud Imaging in Virtual Reality Simulation) [28] ปี 2007

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงผลภาพถ่ายดาวเทียมสามมิติสำหรับงานแสดงผลเสมือนจริง (visual reality) ซึ่งเป็นงานวิจัยนำร่องของงานวิจัยในแผนพัฒนาของประเทศจีน วิธีการในงานวิจัยเสนอการโยกย้าย (transformation) ตำแหน่งพิกัด (coordinate) และการฉาย (projection) ข้อมูลของเมฆในภาพถ่ายดาวเทียมลงบนตำแหน่งในแกนปริภูมิ เพื่อแสดงผลสามมิติ โดยภาพถ่ายดาวเทียมในรูปแบบที่ 3.10 ผลแสดงผลสามมิติได้ตั้งตัวอย่างในรูปแบบที่ 3.11 อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เน้นเสนอวิธีการโยกย้ายพิกัดและการฉายข้อมูลเป็นหลัก ทำให้จึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบผลการแสดงผลสามมิติได้มากนัก อีกทั้งไม่ได้เสนอวิธีการใหม่ในการแสดงผลภาพสามมิติของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียม จึงใช้เป็นเพียงอีกตัวอย่างหนึ่งที่นักวิจัยให้สนใจในการสร้างภาพสามมิติของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียม



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมที่นำมาใช้ในงานวิจัยในหัวข้อ 3.1.6



รูปที่ 3.11 ผลการแสดงผลสามมิติของงานวิจัยหัวข้อ 3.1.6 ที่สร้างจากภาพถ่ายดาวเทียมในรูปที่ 3.10 ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมที่นำมาใช้ในงานวิจัยในหัวข้อ 3.1.6

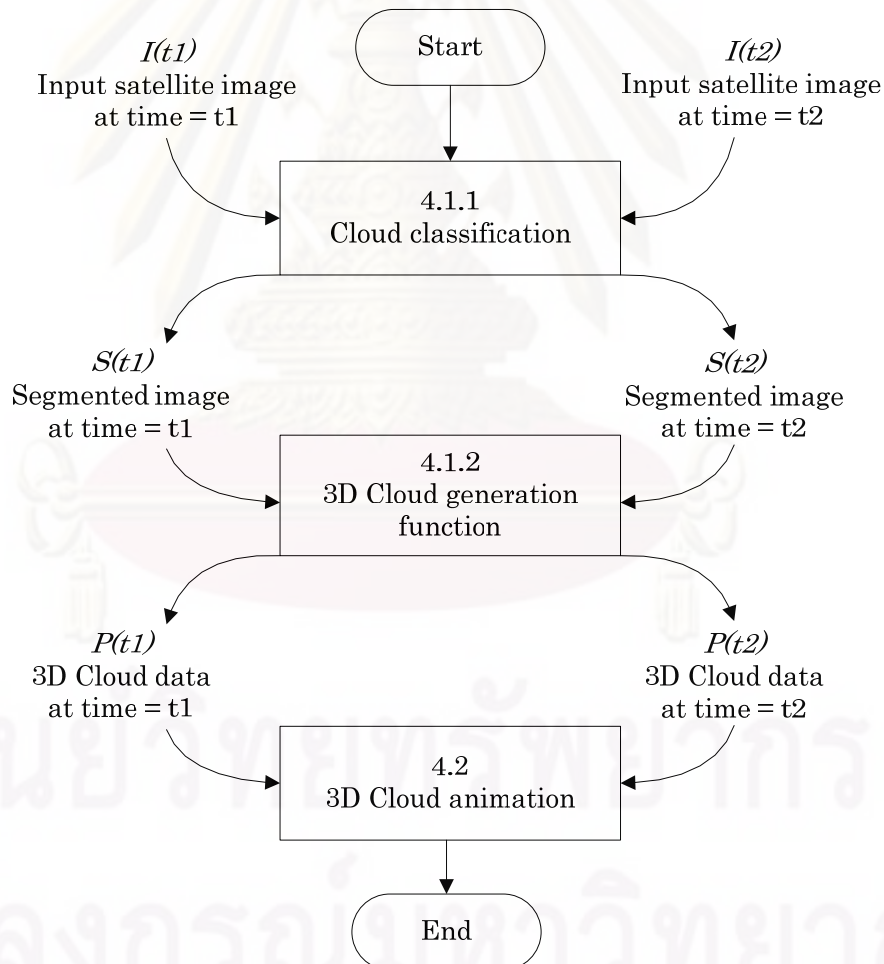
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยเพื่อจำลองภาพเคลื่อนไหวเมฆในสามมิติของงานวิจัยประกอบด้วย 2 ขั้นตอนใหญ่ โดยในขั้นตอนแรกเป็นการสร้างแบบจำลองสามมิติของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียมสองมิติ ซึ่งจะทำการจำแนกชั้นเมฆของภาพถ่ายดาวเทียมออกเป็นระดับชั้นที่ต้องการ (หัวข้อที่ 4.1.1) แล้วนำมาทำกำเนิดข้อมูลเมฆ (Cloud Generation) เพื่อให้ได้ข้อมูลค่าสีของจุดแต่ละจุดในปริภูมิสามมิติ (หัวข้อที่ 4.1.2)

สำหรับขั้นตอนต่อไป วิธีของงานวิจัยจะนำผลลัพธ์ข้อมูลค่าสีสามมิติที่สร้างขึ้นใหม่ของภาพถ่ายดาวเทียมช่วงเวลา t_1 และ t_2 มาสร้างเป็นภาพเคลื่อนไหวของเมฆ (หัวข้อที่ 4.2) ดังที่แสดงเป็นขั้นตอนการทำงานของงานวิจัย ในแผนภูมิรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานของงานวิจัย

4.1 การจำลองเมฆในสามมิติ

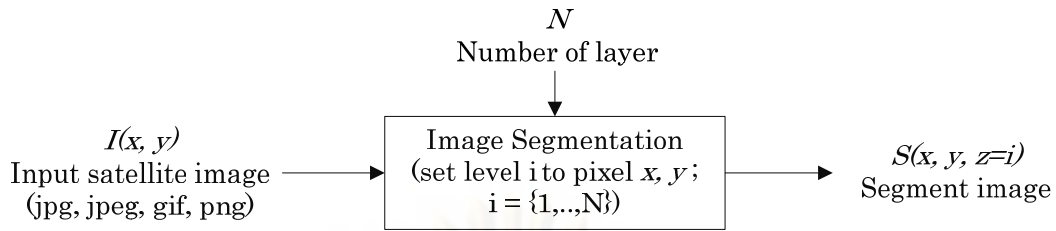
โดยปกติข้อมูลเมฆที่ปรากฏในภาพถ่ายดาวเทียมสองมิติจะไม่เพียงพอต่อการนำไปสร้างภาพเมฆสามมิติที่สมบูรณืได้ เนื่องจากภาพถ่ายดาวเทียมภาพหนึ่ง ๆ จะแสดงเฉพาะข้อมูลเพียงอย่างเดียวของเมฆ เช่น ข้อมูลความชื้น, ข้อมูลความหนาของชั้นเมฆ, ข้อมูลอุณหภูมิ หรือข้อมูลความสูงของหลังคาเมฆ (cloud roof) ฉะนั้นในการจำลองภาพสามมิติของเมฆด้วยข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเพียงภาพเดียว จะต้องสร้างหรือจำลองข้อมูลเมฆส่วนที่ไม่มีขึ้นมาทดแทน โดยข้อมูลที่ต้องการสำหรับการแสดงภาพเมฆในสามมิติก็คือข้อมูลค่าสีของเมฆแต่ละจุดในสามมิติ

วิธีการสร้างแบบจำลองของเมฆในงานวิจัยฯ จะเริ่มต้นด้วยการรับข้อมูล (Input data) ภาพถ่ายดาวเทียมของเมฆ (satellite cloud image) ชนิดสามารถเห็นได้ (visible image) หรือชนิดอินฟราเรด (infrared image) แล้วนำมาแบ่งส่วนภาพ (segmentation) เพื่อจำแนกชั้นเมฆ (cloud Classification) ด้วยค่าสี (intensity) ของจุดภาพ (pixel) ให้ได้กลุ่มของเมฆในระดับชั้นต่าง ๆ (cloud level) ซึ่งวิธีการแบ่งส่วนจะขึ้นอยู่กับชนิดของภาพถ่ายดาวเทียมที่รับเข้ามา ดังจะอธิบายวิธีการในหัวข้อที่ 4.1.1.1 และ 4.1.1.2

เมื่อได้ระดับชั้นของเมฆของแต่ละจุดภาพแล้ว ก็ให้นำข้อมูลดังกล่าวเข้าสู่ฟังก์ชันก่อกำเนิดเมฆสามมิติ (3D cloud generation function) เพื่อให้ได้ค่าสีของจุดภาพเมฆในระบบสามมิติ (cloud voxel) ซึ่งผลลัพธ์ของค่าสีนี้ เปรียบได้กับปริมาณของเมฆในแต่ละตำแหน่ง และเป็นตัวแทนความหนาแน่นของอนุภาคเมฆในการนำไปแสดงผลภาพสามมิติของเมฆนั่นเอง สำหรับวิธีการที่นำมาใช้สร้างเป็นฟังก์ชันก่อกำเนิดเมฆสามมิติ (3D cloud generation function) ได้พัฒนามาจากหลักการของวิธีทางเซลล์ลาร์อโตมาตา ซึ่งสามารถนำค่าหรือสถานะของมิติที่ $n - 1$ มาพิจารณาสร้างข้อมูลใหม่ในมิติที่ n ได้ ดังจะอธิบายในหัวข้อที่ 4.1.2 ต่อไป

4.1.1 วิธีการจำแนกชั้นเมฆของภาพถ่ายดาวเทียม

ขั้นตอนแรกของงานวิจัยฯ จะนำข้อมูลค่าสีของเมฆซึ่งเป็นสเกลสีเทา (grayscale) ในภาพถ่ายดาวเทียมสองมิติ $I(x, y)$ มากำหนดระดับชั้น i ตามที่ผู้ใช้ (user) ได้นำเข้าข้อมูลชั้นเมฆทั้งหมด N ชั้นไว้ เพื่อให้ได้ข้อมูลในปริภูมิสามมิติที่เก็บค่า $S(x, y, z = i)$ ดังแสดงเป็นแผนภูมิรับเข้าและส่งออกข้อมูลในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภูมิแสดงข้อมูลที่นำเข้า และส่งออกของการแบ่งชั้นจุดภาพถ่ายดาวเทียมของเมฆ

การจำแนกเมฆบนภาพถ่ายดาวเทียมออกเป็นชั้นต่าง ๆ จะพิจารณาจุดสีของจุดภาพ (pixel) ในภาพถ่ายดาวเทียม ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็นระดับชั้นตามจำนวนที่ถูกกำหนดขึ้น และให้จุดสีที่สว่างที่สุดคือจุดที่อยู่ในชั้นบนสุด ส่วนบริเวณของจุดที่มีดที่สุดก็คือส่วนที่เป็นพื้นน้ำหรือพื้นดิน และค่าสีอื่น ๆ จะถูกไล่เรียงกันตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการแบ่งระดับชั้นให้กับจุดสีที่ตำแหน่ง (x, y) ของภาพถ่ายดาวเทียมแล้ว ก็จะทำให้สร้างข้อมูลสามมิติ $S(x, y, z)$ โดยที่ตำแหน่ง (x, y) แต่ละคู่จะมีค่า $z = i$ เพียงค่าเดียว และกำหนดให้ $S(x, y, z = i)$ ดังกล่าวมีค่าเท่ากับ C โดยที่ C มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 แสดงขั้นตอนการทำงานในแผนภูมिरูปที่ 4.3 โดยแผนภูมิมุ่งซ้ายเป็นขั้นตอนของการกำหนดระดับชั้นของแต่ละจุดสี ส่วนฝั่งขวาเป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับข้อมูลสามมิติเพื่อนำไปสร้างวอกเซล (voxel) ในขั้นตอนต่อไป

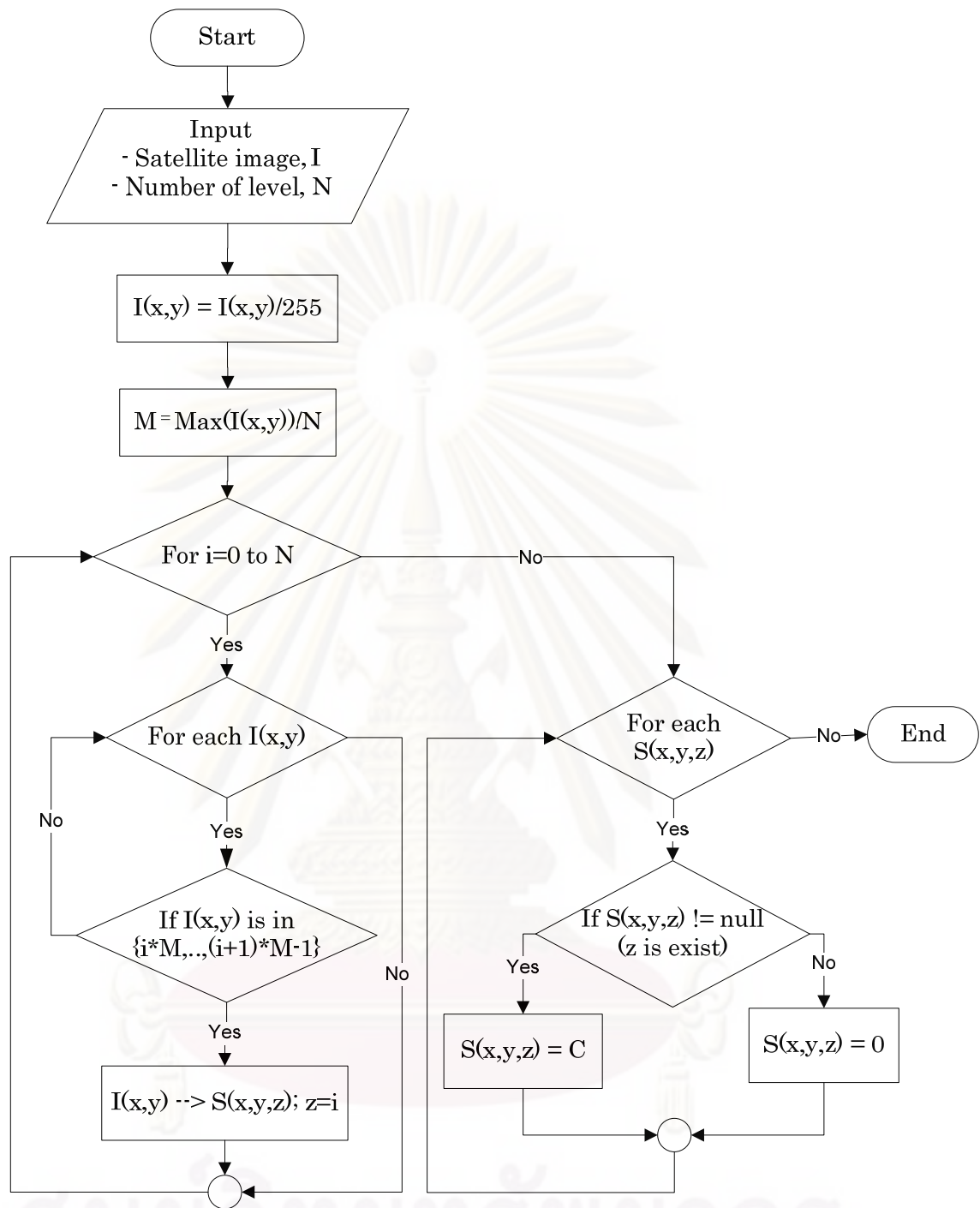
อย่างไรก็ตามข้อมูลที่นำเข้ามีทั้งแบบที่เป็นภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นและภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรด จึงต้องพิจารณาการแบ่งส่วนจุดสีของเมฆต่างกันไปดังนี้

4.1.1.1 การแบ่งส่วนภาพถ่ายดาวเทียมชนิดเห็นได้

เนื่องจากภาพถ่ายดาวเทียมชนิดนี้ มีความแตกต่างระหว่างค่าสีของส่วนที่เป็นเมฆกับส่วนที่เป็นพื้นดินค่อนข้างมาก รวมถึงสีของจุดภาพได้ไล่ระดับความเข้มตามความหนาของเมฆ จึงได้พิจารณาแบ่งสีของเมฆตามวิธีการในแผนภูมिरูปที่ 4.3 แต่ให้ค่าสีช่วงที่เห็นเป็นสีดำ (คือค่า 0 ไปจนถึงค่า k_1 ในสเกลสีเทา โดย k_1 เป็นค่าที่กำหนดขึ้นเองจากการสังเกต) เป็นส่วนของพื้นทั้งหมด

4.1.1.2 การแบ่งส่วนภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรด

สำหรับภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรดเป็นภาพถ่ายที่มีสเกลสีตามค่าในสเปกตรัมที่ตรวจวัดได้ จุดสีของภาพถ่ายดาวเทียมชนิดนี้จึงอยู่ในช่วงที่ไม่ต่างกันชัดเจนเมื่อมองด้วยสายตาของมนุษย์ นอกจากนี้ส่วนที่เป็นพื้นอาจไม่ปรากฏอยู่ในภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรด เนื่องจากดาวเทียมจะตรวจวัดเฉพาะข้อมูลอากาศภายในชั้นบรรยากาศของโลก ส่งผลให้ส่วนที่เข้มที่สุดของภาพถ่ายดาวเทียมชนิดนี้จะอยู่ในช่วงสีเทาเท่านั้น จึงพิจารณาให้ช่วงสีเทาที่ไม่แสดงลักษณะของเมฆชัดเจนเป็นส่วนของพื้น ฉะนั้นทุกจุดสีที่มีค่าน้อยกว่า k_2 ให้ถือเป็นส่วนของพื้นทั้งหมด



รูปที่ 4.3 แผนภูมิแสดงการแบ่งชั้นจุดสีของภาพดาวเทียม และกำหนดค่าเริ่มต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.2 วิธีทางเซลล์ลาร์อโตมาตาเพื่อสร้างข้อมูลสามมิติของเมฆ

ข้อมูลที่ได้จากการจำแนกชั้นของเมฆในภาพถ่ายดาวเทียมจะถูกนำไปใช้สร้างเป็นข้อมูลสามมิติของเมฆตามวัตถุประสงค์ ซึ่งในหัวข้อนี้จะเสนอกฎของวิธีทางเซลล์ลาร์อโตมาตาเพื่อนำมาใช้เป็นฟังก์ชันสำหรับกำหนดค่าให้กับข้อมูลในตารางสามมิติ หรือค่าในวอกเซล โดยมีสมมติฐานว่าถ้าหากตำแหน่ง (x, y, z) ที่กำลังพิจารณาถูกแวดล้อมด้วยเมฆในปริมาณมาก ก็เดาว่าตำแหน่งดังกล่าวอาจมีสถานะเป็นเมฆ แต่หากมีปริมาณเมฆเพียงเล็กน้อยก็เดาว่าตำแหน่งดังกล่าวอาจไม่ได้มีสถานะเป็นเมฆ

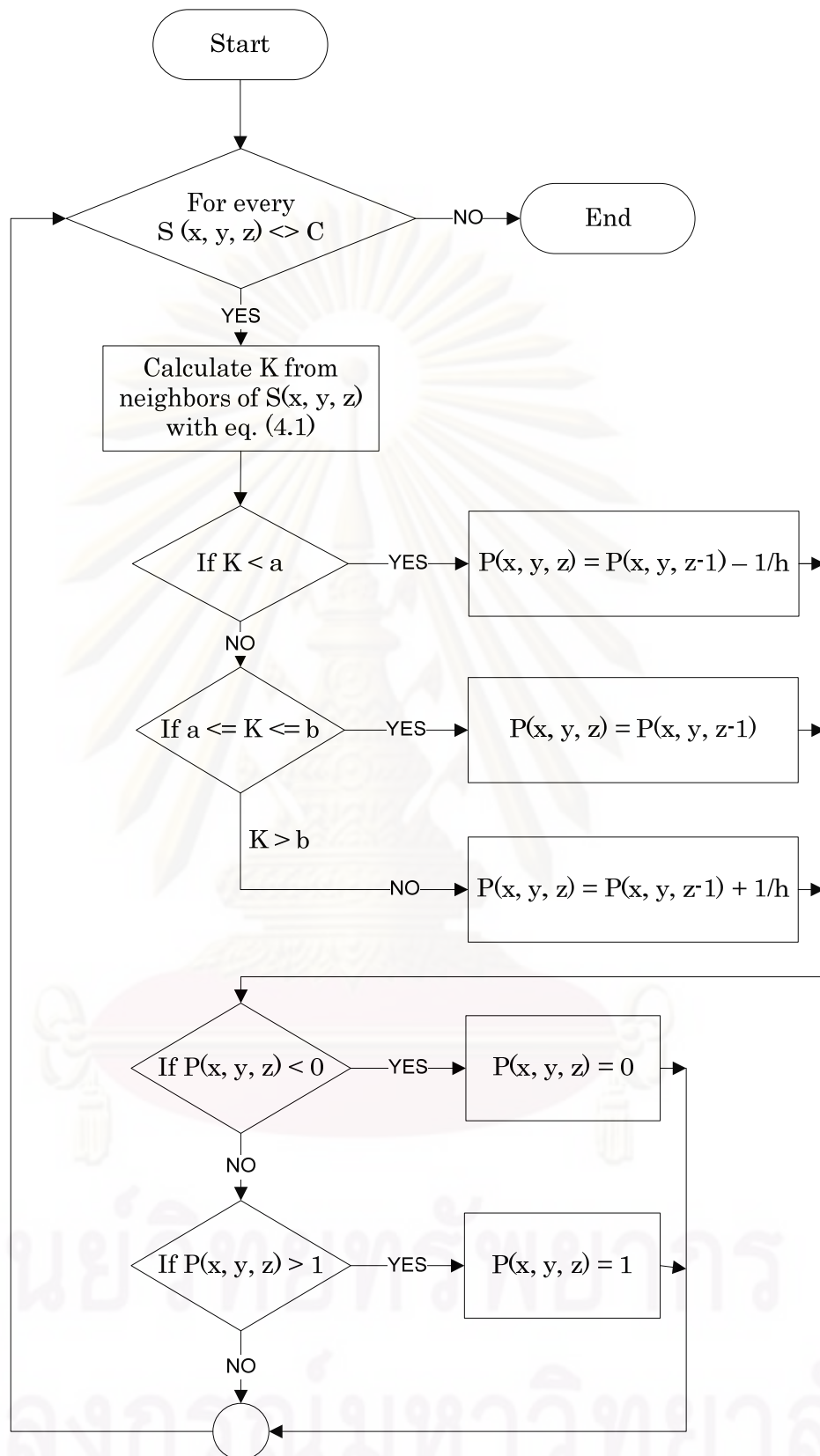
สำหรับค่า $K(x, y, z)$ ในสมการที่ 4.1 เป็นการนำเพื่อนบ้านรอบจุด x, y, z ทั้งหมดมาหาปริมาณโดยรวมเพื่อพิจารณาคุณสมบัติความเป็นเมฆรอบจุด x, y, z และกำหนดน้ำหนัก (weight) เพื่อนบ้านในแต่ละตำแหน่งตามที่ผู้ใช้กำหนด โดยกำหนดให้ตัวแปร n ในสมการดังกล่าวแทนอันดับของเพื่อนบ้านที่อยู่รอบข้าง อาทิเช่น เมื่อ $n = 1$ จะนำเฉพาะเพื่อนบ้านทั้งหมดที่อยู่ติดกับตำแหน่ง (x, y, z) ที่กำลังพิจารณานำมาคำนวณในสมการ หรือเมื่อ $n = 2$ ก็จะนำเพื่อนบ้านที่อยู่ถัดออกไปอีกหนึ่งช่วงเซลล์มาพิจารณาด้วย สำหรับค่า k หมายถึงลำดับของแถวที่อยู่ในมิติที่สามโดยที่เมื่อ $k = 0$ ก็คือพิจารณาในแถวเดียวกับตำแหน่ง (x, y, z) ดังกล่าว และที่ $k = 1$ คือพิจารณาในแถวที่อยู่ด้านบนขึ้นไปหนึ่งลำดับ

$$K(x, y, z) = \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-n}^n \sum_{k=-1}^0 W_{x+i, y+j, z+k} \times P(x+i, y+j, z+k) \quad 4.1$$

เมื่อได้ค่า $K(x, y, z)$ ของแต่ละจุดตามสมการที่ 4.1 แล้วก็จะนำมาพิจารณาคูสมบัติความเป็นเมฆ เพื่อกำหนดค่าสีของจุดเมฆสามมิติให้กับ $P(x, y, z)$ ทุกตัว ตามสมการที่ 4.2 ซึ่งค่า $P(x, y, z)$ ดังกล่าวจะพิจารณาตามเงื่อนไขว่าหาก $K(x, y, z)$ มีค่าน้อยกว่า a (บริเวณนั้นมีปริมาณเมฆน้อย) ค่าที่ได้ก็จะลดขนาดลงจากเพื่อนบ้านที่อยู่ชั้นบนไปอีก $1/h$ แต่ถ้าว $K(x, y, z)$ มีค่ามากกว่า b (บริเวณนั้นมีปริมาณเมฆมาก) ค่าที่ได้ก็จะเพิ่มขนาดขึ้นจากเพื่อนบ้านที่อยู่ข้างบนเท่ากับ $1/h$ เช่นกัน ส่วนค่า $K(x, y, z)$ ที่อยู่ในช่วง a ถึง b ก็จะทำให้คงค่าไว้เท่ากับเพื่อนบ้านที่อยู่ชั้นบนของตัวมัน แสดงเป็นแผนภูมิการทำงานของขั้นตอนในรูปที่ 4.4

$$P(x, y, z) = \begin{cases} P(x, y, z-1) - \frac{1}{h}, & K(x, y, z) < a \\ P(x, y, z-1) + \frac{1}{h}, & K(x, y, z) > b \\ P(x, y, z-1), & b \leq K(x, y, z) \leq a \end{cases} \quad 4.2$$

สำหรับค่า a , b และ $1/h$ จะกำหนดโดยผู้ใช้ ผ่านการใช้งานในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อทดสอบวิธี และแสดงผลภาพสามมิติ หลังจากได้ค่า $P(x, y, z)$ ทั้งหมดแล้ว ก็จะนำข้อมูลดังกล่าวไปสร้างภาพสามมิติของเมฆ



รูปที่ 4.4 แผนผังการทำงานในขั้นตอนการสร้างข้อมูลสามมิติของเมฆ

4.2 การสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆในสามมิติ

ขั้นตอนการสร้างภาพเคลื่อนไหวในสามมิติของเมฆในงานวิจัยฯ จะทำการรับเข้าข้อมูล $P(x, y, z)$ ซึ่งเป็นค่าสีของเมฆในสามมิติ (หรือค่าปริมาณของเมฆ) จำนวนสองชุด ซึ่งสร้างจากภาพถ่ายดาวเทียมต้นทาง โดยให้แทนด้วย $p_{t1}(x, y, z)$ และภาพถ่ายดาวเทียมปลายทาง โดยให้แทนด้วย $p_{t2}(x, y, z)$ เพื่อนำมาสร้างเป็นภาพเคลื่อนไหวของเมฆที่เวลา t_1 จนถึง t_2 โดยวิธีที่นำมาใช้ในงานวิจัยฯ คือวิธีแลตทิซแก๊สออตโตมาตา ซึ่งสามารถอัปเดตทิศทางการเคลื่อนที่ในเวลา $t + 1$ ด้วยสถานะเวกเตอร์ของเพื่อนบ้านในเวลา t ที่ผ่านมา และเชื่อว่าจะสามารถเคลื่อนย้ายเมฆแต่ละจุดให้คล้ายคลึงกับลักษณะของของไหลได้

งานวิจัยฯ ได้เลือกแลตทิซแก๊สออตโตมาตาชนิด FPH ซึ่งใช้แลตทิซแบบ 6 บัพ เพื่อนบ้าน (hexagonal lattice) มาทดลอง เพราะมีกฎที่ไม่ซับซ้อนแต่สามารถเปลี่ยนทิศทางของอนุภาคได้ภายใต้กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม แต่อย่างไรก็ดีกริดของข้อมูลเมฆสามมิติ $P(x, y, z)$ มีความแตกต่างจากกริดแบบที่มีเพื่อนบ้าน 6 บัพ จึงต้องทำการปรับรูปแบบตำแหน่งภายในกริด (ซึ่งประกอบด้วย 8 เพื่อนบ้านในสองมิติ และ 26 เพื่อนบ้านในสามมิติ) ให้สอดคล้องกับกริดของวิธี FPH โดยงานวิจัยฯ จะพิจารณาการปรับกริดที่ไม่ซับซ้อนมากนัก และใช้ได้กับการเคลื่อนที่ของเมฆสามมิติสำหรับการแสดงผลทางคอมพิวเตอร์กราฟิกส์ ซึ่งอธิบายวิธีการปรับกริดในงานวิจัยดังหัวข้อที่ 4.2.1

นอกจากนี้ทิศทางการเคลื่อนที่ที่จะต้องถูกกำหนดที่ตอนต้นของกระบวนการเพื่อใช้เป็นเวกเตอร์ความเร็วต้นหรือทิศทางเริ่มต้นของเวกเตอร์แลตทิซ สำหรับเคลื่อนอนุภาคบนแลตทิซในวิธีแลตทิซแก๊สออตโตมาตา แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นข้อมูลในงานวิจัยฯ มีเพียงเฉพาะข้อมูลค่าสี (หรือปริมาณ) ของเมฆที่ $p_{t1}(x, y, z)$ และ $p_{t2}(x, y, z)$ จึงทำให้จำเป็นต้องหาวิธีที่จะกำหนดทิศทางเริ่มต้นของเวกเตอร์แลตทิซ (lattice vector) โดยการใช้การเปรียบเทียบระหว่างค่าใน $p_{t1}(x, y, z)$ และ $p_{t2}(x, y, z)$ ของตัวเองกับเพื่อนบ้านรอบข้าง ดังจะอธิบายในหัวข้อที่ 4.2.2

หลังจากกำหนดทิศทางเริ่มต้นให้กับเวกเตอร์แลตทิซแล้ว ในขั้นเวลาต่อไปจะอัปเดตสถานะของเวกเตอร์ โดยเคลื่อนเวกเตอร์ไปยังบัพต่าง ๆ ของแลตทิซ, อัปเดตทิศทางเมื่อมีการชนกันภายในบัพ ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อย่อยที่ 4.2.3 และ 4.2.4 ตามลำดับ ส่วนการคำนวณค่าเวกเตอร์เพื่อนบ้านมาแสดงเป็นค่าสี (หรือปริมาณเมฆ) สำหรับแสดงผลภาพสามมิติของเมฆจะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.5

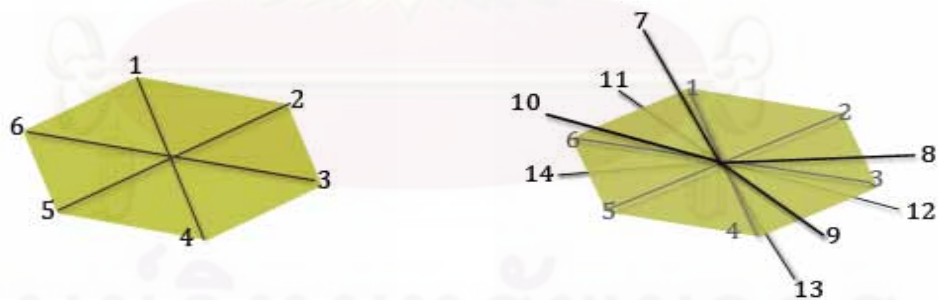
อย่างไรก็ดีเนื่องจากสถานะของเมฆจะมีการเพิ่มปริมาณขึ้นลงตลอดเวลา ซึ่งเป็นอยู่นอกเหนือคุณสมบัติของแลตทิซแก๊สออตโตมาตาที่มีเฉพาะการเคลื่อนที่และเปลี่ยนทิศทางเมื่อเกิดการชนเท่านั้น ด้วยเหตุนี้งานวิจัยฯ จึงได้พิจารณาเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงสถานะเมฆเพิ่มเติมเพื่อครอบคลุมการเพิ่มขึ้นและลดลงใหม่ของเมฆ โดยมีเงื่อนไขที่นำมาพิจารณาดังหัวข้อที่ 4.2.6

4.2.1 การปรับกริดเพื่อใช้ในงานวิจัยฯ

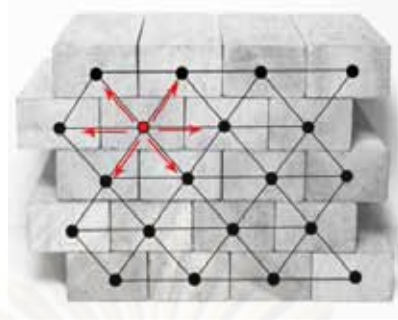
เพื่อให้กริดแบบที่มี 8 เพื่อนบ้านในสองมิติ และ 26 เพื่อนบ้านในสามมิติใช้ได้กับแลตทิซของวิธีแก๊สแลตทิซชนิด FHP งานวิจัยฯ ได้ปรับรูปแบบกริดลักษณะดังกล่าวให้กลายเป็นกริดที่มี 6 ตำแหน่งเพื่อนบ้านสำหรับสองมิติ และ 4 ตำแหน่งเพื่อนบ้านทั้งด้านบนและด้านล่าง เพื่อให้ครอบคลุมการเคลื่อนที่ใน 3 มิติ ซึ่งลักษณะของแลตทิซที่จะใช้ในกระบวนการสร้างภาพเคลื่อนไหวแสดงดังรูปที่ 4.5 โดยมีจำนวนรวมทั้งหมด 14 บัพ แบ่งเป็นทิศทางที่อยู่ในแนวระนาบจำนวน 6 บัพ และอยู่ในแนวทแยงมุมสามมิติจำนวน 8 บัพ

สำหรับในแกนสามมิติหรือแนวทแยงมุมเสนอเพิ่มเติมเพียง 8 เส้นแลตทิซ ทั้งนี้เนื่องจากในขั้นตอนทดลองการกำหนดกฎของ 8 แลตทิซจะมีความไม่ยุ่งยากมาก และสำหรับกรณีบัพที่อยู่ในแนวตั้งไม่นำพิจารณา เนื่องจากในกรณีที่อนุภาคเมฆบริเวณเดียวกันส่วนใหญ่เคลื่อนตัวไปในแนวระนาบ หากมีตัวใดตัวหนึ่งเคลื่อนที่ขึ้นหรือลง เมื่อเวลาผ่านไปอาจส่งผลให้อนุภาคที่มีลักษณะดังกล่าวยังเคลื่อนที่อยู่ในแนวตั้งเช่นเดิมโดยไม่เคลื่อนตัวไปพร้อมกับกลุ่มด้วยเหตุนี้จึงไม่นำการเส้นแลตทิซที่อยู่ในแนวตั้งร่วมพิจารณา เพราะจะมีผลต่อภาพเคลื่อนไหวของเมฆโดยรวม ทั้งนี้ทั้งนั้นการพิจารณาเช่นนี้อาจจะไม่ครบถ้วนตามลักษณะความน่าจะเป็นในการเคลื่อนที่ของเมฆแท้จริง

ในการปรับลักษณะของกริดซึ่งเดิมเรียงกันแบบกริดสี่เหลี่ยม (square grid) หรือเชื่อมต่อกันแบบแลตทิซสี่เหลี่ยม (square lattice) งานวิจัยฯ ได้พิจารณาเลื่อนแถวที่อยู่ในตำแหน่งติดกันให้เรียงแถวโดยการเหลื่อมกันครึ่งเซลล์และทำการเชื่อมต่อบัพของเซลล์ที่อยู่ข้างเคียงทั้ง 6 เซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



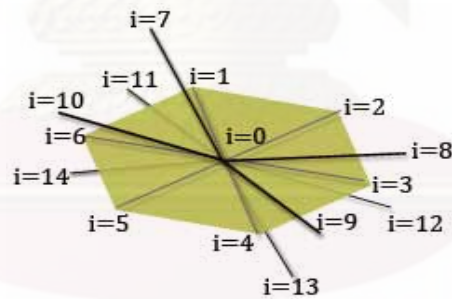
รูปที่ 4.5 บัพเพื่อนบ้านและตำแหน่งที่ใช้ในงานวิจัยฯ โดยในแนวระนาบ (ซ้าย) มีจำนวน 6 บัพ และแนวทแยงสำหรับการเคลื่อนที่ในสามมิติ (ขวา) มีจำนวนรวม 8 บัพ



รูปที่ 4.6 ตัวอย่างการปรับบัฟ (node) จากกริด ที่มี 8 เพื่อนบ้านในแนวระนาบ ไปสู่กริดแบบ 6 เพื่อนบ้าน

บัฟ $n(x, y, z)$ เชื่อมโยงกับบัฟเพื่อนบ้านโดยแสดงเป็นลำดับของตำแหน่งบัฟ ในรูปที่ 4.7 ซึ่งตำแหน่งของบัฟ $n(x, y, z)$ ที่กำลังพิจารณามีค่าลำดับตำแหน่ง $i = 0$ เขียนแทนด้วย $n_0(x, y, z)$ และมีค่าเท่ากับ $P(x, y, z)$ ตามค่ากริดที่ได้จากขั้นตอนการสร้างภาพเมฆสามมิติ ส่วนตำแหน่งของเพื่อนบ้านที่อยู่โดยรอบทั้ง 14 บัฟเขียนแทนด้วย $n_i(x, y, z)$ และเลือกตำแหน่งเพื่อนบ้านของ $P(x, y, z)$ มาเป็นเพื่อนบ้านของ $n_0(x, y, z)$ โดยพิจารณาตำแหน่งเพื่อนบ้านที่แต่ละ i ดังกล่าวจากสมการที่ 4.3 ซึ่งค่า I_i , J_i และ K_i ในสมการอ้างอิงตำแหน่งจากค่าที่ระบุไว้ในตารางที่ 4.1

$$n_i(x, y, z) = P(x + I_i, y + J_i, z + K_i) \quad 4.3$$



รูปที่ 4.7 แสดงค่าประจำตำแหน่ง i ของแลตทิซที่ใช้ในงานวิจัยฯ

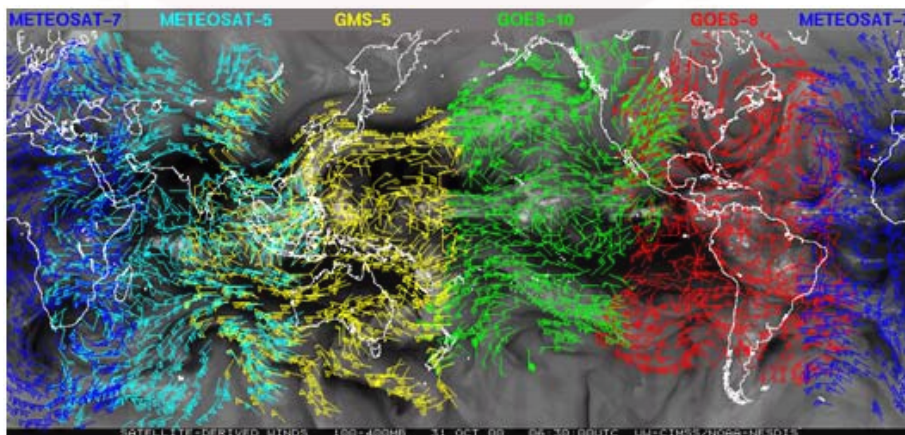
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่า I_i , J_i และ K_i สำหรับสมการที่ 4.3 เพื่ออ้างอิงตำแหน่งเพื่อนบ้าน

i	I	J	K
0	0	0	0
1	-1	1	0
2	0	1	0
3	1	0	0
4	0	-1	0

i	I	J	K
5	-1	-1	0
6	-1	0	0
7	-1	1	-1
8	1	1	-1
9	1	1	1
10	-1	1	1
11	-1	-1	-1
12	1	-1	-1
13	1	-1	1
14	-1	-1	1

4.2.2 การหาทิศทางและการเคลื่อนที่เริ่มต้นในการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆ

ในงานวิจัยเพื่อแสดงภาพเคลื่อนไหวของเมฆในภาพถ่ายดาวเทียม โดยมากจะต้องมีเวกเตอร์ทิศทางสำหรับเมฆแต่ละตำแหน่งดังตัวอย่างรูปที่ 4.8 ซึ่งอาจมาจากข้อมูลที่มีอยู่เดิม เช่นข้อมูลอุณหภูมิตั้งต้น ข้อมูลของความเร็วลม เป็นต้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยก็ใช้การสังเกตจากแอนิเมเตอร์ (animator) โดยดูแนวโน้มของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียมหลาย ๆ รูป แล้วกำหนดทิศทางลงไป แต่สำหรับในงานวิจัยนี้ซึ่งใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเพียงสองภาพและไม่ข้อมูลทิศทางลมหรืออุณหภูมิตั้งต้น ผู้วิจัยจึงใช้วิธีเปรียบเทียบปริมาณเมฆของภาพถ่ายดาวเทียมแต่ละพื้นที่ เพื่อหาแนวโน้มในการกำหนดเวกเตอร์แลตทิซหรือทิศทางเคลื่อนที่เริ่มต้นของเมฆ โดยมีหลักการเบื้องต้นดังหัวข้อที่ 4.2.2.1 และจะแสดงการคำนวณทิศทางในหัวข้อที่ 4.2.2.2

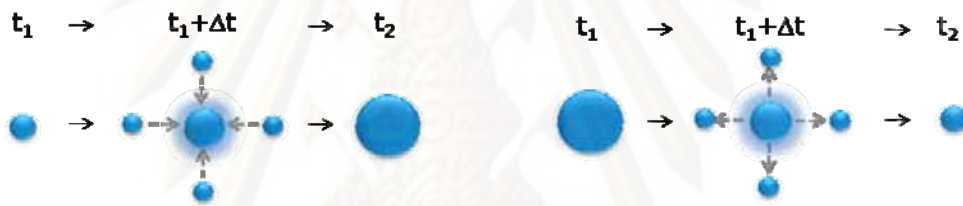


รูปที่ 4.8 ภาพแสดงเวกเตอร์ของสภาพอากาศทั่วโลกจากดาวเทียม ทุก ๆ 6 ชั่วโมง

4.2.2.1 หลักการเบื้องต้นในการหาทิศทาง

สำหรับแนวคิดที่นำมาใช้พิจารณาหาทิศทางเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของเมฆในแต่ละตำแหน่ง จากภาพถ่ายดาวเทียมต้นทางไปยังภาพถ่ายดาวเทียมปลายทาง งานวิจัยฯ จะคำนึงถึงการเพิ่มขึ้นและลดลงของปริมาณเมฆในแต่ละตำแหน่งโดยเปรียบเทียบกับค่าเพิ่มขึ้นและลดลงของเพื่อนบ้านข้างเคียง

จากรูปที่ 4.9 ซ้าย ขณะที่เวลาเปลี่ยนแปลงไป สมมติว่าปริมาณของเมฆ ณ ตำแหน่งที่กำลังพิจารณาปริมาณเพิ่มขึ้น จะถือว่าบริเวณนั้นมีการถ่ายเทปริมาณเมฆจากเพื่อนบ้านข้างเคียงเข้ามาในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ส่วนรูปที่ 4.9 ขวา อธิบายได้ว่าหากขณะเวลาเปลี่ยนแปลง ถ้าปริมาณของเมฆลดลงแสดงว่าเมฆบริเวณดังกล่าวได้เคลื่อนตัวออกหรือถ่ายเทไปยังบริเวณเพื่อนบ้านข้างเคียงในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเช่นเดียวกัน ซึ่งงานวิจัยได้พัฒนาวิธีการหาทิศทางเริ่มต้นของเวกเตอร์แลตทิซจากหลักการดังกล่าว โดยจะอธิบายในหัวข้อย่อยลำดับต่อไป



รูปที่ 4.9 ภาพแสดงการสลายตัวและรวมตัวของเมฆในแต่ละตำแหน่ง (x, y, z) โดยภาพซ้ายเป็นการเปลี่ยนแปลงเมื่อ $p_{t1}(x, y, z) < p_{t2}(x, y, z)$ ส่วนภาพขวาเป็นการเปลี่ยนแปลงเมื่อ $p_{t1}(x, y, z) > p_{t2}(x, y, z)$ โดยเวลา $t2 > t1$

4.2.2.2 การคำนวณทิศทางเคลื่อนที่เริ่มต้น

ให้ $G_{t1}(m)$ เป็นสัดส่วนปริมาณรวมของเมฆภายในบริเวณ $A_{m,1}$ เมื่อเวลา $t1$ และ $G_{t2}(m)$ เป็นสัดส่วนปริมาณรวมของเมฆภายในบริเวณ $A_{m,2}$ เมื่อเวลา $t2$ โดย $A_{m,1}$ และ $A_{m,2}$ เป็นพื้นที่ซึ่งถูกแบ่งด้วยจำนวนช่องหรืออัตราส่วนตามความต้องการเป็นจำนวน m ส่วนของ $p_1(x, y, z)$ และ $p_2(x, y, z)$ ตามลำดับ (ตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ในรูปที่ 4.10) ทั้งนี้กำหนดให้คำนวณค่า $G_t(m)$ ในแต่ละพื้นที่ A_m ด้วยสมการที่ 4.4 และให้ N เป็นจำนวนสมาชิกทั้งหมดภายใน A_m

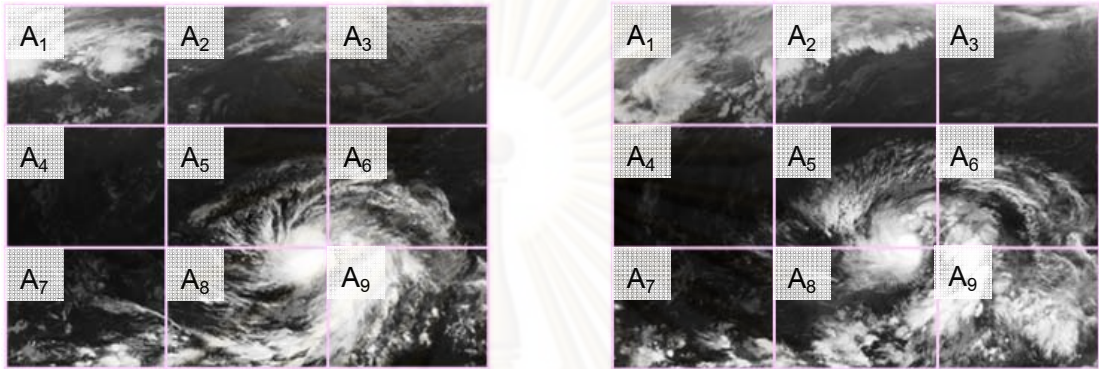
$$G_t(m) = \frac{\sum P_t(x, y, z)}{N}; P_t(x, y, z) \in A_m \quad 4.4$$

หลังจากการแบ่งพื้นที่และหาปริมาณรวม $G_t(m)$ ของแต่ละพื้นที่ A_m แล้ว ก็จะทำการศึกษาความแตกต่างระหว่าง $G_{t1}(m)$ และ $G_{t2}(m)$ ตามสมการที่ 4.5

$$d(m) = G_{t2}(m) - G_{t1}(m)$$

4.5

ลำดับต่อมาจะทำการเปรียบเทียบ $d(m)$ ของแต่ละพื้นที่กับเพื่อนบ้านข้างเคียง โดยพิจารณาตำแหน่งของเพื่อนบ้าน 14 บัพ (ในสามมิติ) เช่นเดียวกับค่าในตารางที่ 4.1

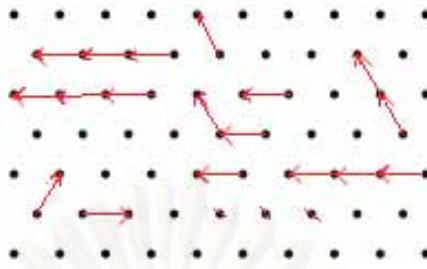


รูปที่ 4.10 ภาพตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ของภาพถ่ายดาวเทียมออกเป็นขนาด 3 x 3 (สองมิติ) เพื่อหาปริมาณรวม โดยภาพซ้ายเป็นตัวอย่างของ $G_{t1}(m)$ และภาพขวาเป็น $G_{t2}(m)$

สำหรับทุก $d(m) < 0$ หรือทุกพื้นที่ ๆ มีปริมาณเมฆลดน้อยลงเมื่อเวลาผ่านไป ให้มีเวกเตอร์ทิศทางชี้ไปยังเพื่อนบ้านที่ปริมาณเมฆเพิ่มขึ้นมากที่สุด โดยการพิจารณาเวกเตอร์ให้กับทุก $p_{t1}(x, y, z)$ ที่มีเมฆ หรือที่ $p_{t1}(x, y, z) > 0$ ตามการพิจารณาเป็นลำดับต่อไปนี้

1. พิจารณาที่ขนาดพื้นที่แบ่งส่วนครั้งที่ 1, แทนด้วย A_m' มีขนาดเท่ากับ 20% ของพื้นที่ทั้งหมด (แบ่ง 5 ส่วน) โดยให้ $p_{t1}(x, y, z) \in A_m'$ ที่ $d(m)' < 0$ ทุกตัวมีทิศทางไปยังเพื่อนบ้านที่เพิ่มมากที่สุดภายใน A_m'
2. ทุกพื้นที่ A_m' ที่ยังไม่มีทิศทาง ให้แบ่งเป็นพื้นที่ใหม่อีกครั้ง, แทนด้วย A_m'' ขนาดกว้าง 10 พิกเซล, ยาว 10 พิกเซล และสูงเท่ากับ 1/3 ของจำนวนชั้นเมฆ จากพื้นที่ทั้งหมด จากนั้นจึงให้ $p_{t1}(x, y, z) \in A_m''$ ที่ $d(m)'' < 0$ ทุกตัว มีทิศทางไปยังเพื่อนบ้านที่เพิ่มมากที่สุดของ A_m''
3. หาก $p_{t1}(x, y, z)$ ในข้อ 2 ได้ยังไม่มีทิศทาง ให้พิจารณาเพื่อนบ้านที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเป็นลำดับสองของพื้นที่กริดในข้อที่ 1 และข้อ 2 ตามลำดับ
4. หาก $p_{t1}(x, y, z)$ ในข้อ 3 ได้ยังไม่มีทิศทาง ให้พิจารณาเพื่อนบ้านตำแหน่ง $p_{t1}(x, y, z)$ เอง
5. เมื่อพิจารณาในข้อ 4 แล้ว $p_{t1}(x, y, z)$ ตัวใดที่ไม่มีทิศทางอีก ให้ถือว่าตำแหน่งนั้นเป็นอนุภาคนิ่ง (rest particle) ซึ่งจะเคลื่อนที่เมื่อมีตัวอื่นมาชน

และด้วยวิธีการดังกล่าว ในแต่ละบัพที่ $p_{t1}(x, y, z)$ มีค่าเป็นเมฆ จะได้มีเวกเตอร์ชี้ไปยังเพื่อนบ้านตัวใดตัวหนึ่ง หรือหยุดอยู่กับที่ ซึ่งแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ภาพลักษณะเวกเตอร์แลตทิซในสองมิติ ที่ได้จากขั้นตอนการหาทิศทางเริ่มต้น

4.2.2.3 การกำหนดค่าให้เวกเตอร์แลตทิซ

ในทุกตำแหน่งบัพ $p_{t1}(x, y, z)$ ที่มีเวกเตอร์ที่ชี้ทิศไปยังเพื่อนบ้านตัวใดตัวหนึ่ง หรือบัพ $p_{t1}(x, y, z)$ ที่เป็นอนุภาคหนึ่ง ค่าของเวกเตอร์จะถูกกำหนดให้มีขนาดเท่ากับ 1 หน่วย และมีทิศทางทำมุมเดียวกับตำแหน่งเพื่อนบ้านที่ชี้ไป ซึ่งเรียกว่าเวกเตอร์แลตทิซลำดับที่ i ตามลำดับในรูปที่ 4.7 และแสดงด้วยค่าบิต (bit) 1 หรือ 0 ทั้งนี้การกำหนดค่าเวกเตอร์แลตทิซของบัพแต่ละบัพให้กับเส้นแลตทิซที่เชื่อมโยงไปยังบัพเพื่อนบ้านทั้ง 14 บัพ และตัวมันเองอีก 1 ค่า จะพิจารณาดังต่อไปนี้

- สำหรับทุก $p_{t1}(x, y, z)$ ที่ไม่มีเมฆ จะไม่สนใจนำมาพิจารณา ฉะนั้นจึงไม่มีค่าของเวกเตอร์แลตทิซในตำแหน่งดังกล่าว ซึ่งเขียนแทนด้วย $n_0(t, r) = 0$ โดย $n_0(t, r)$ เป็นค่าบิตของเวกเตอร์แลตทิซลำดับที่ $i = 0$ ของบัพในตำแหน่ง (x, y, z) ที่พิจารณาเมื่อเวลา t หรือก็คือตัวมันเองนั่นเอง
- สำหรับทุก $p_{t1}(x, y, z)$ ที่มีเมฆ ถ้ามีเวกเตอร์ชี้ไปยังเพื่อนบ้านตำแหน่งใด ให้เวกเตอร์แลตทิซลำดับที่ i นั้นมีค่าเท่ากับ 1 โดยเขียนแทนด้วย $n_i(t, r) = 1$ และหากเพื่อนบ้านใดไม่มีเวกเตอร์ชี้ไป ก็ให้เวกเตอร์แลตทิซลำดับที่ i นั้นมีค่าเท่ากับ 0 เขียนแทนด้วย $n_i(t, r) = 0$ โดย n_i คือค่าบิตของเวกเตอร์แลตทิซในตำแหน่งที่ $i=1,2,\dots,14$ ของ r ที่เวลา t ซึ่ง r คือเวกเตอร์ในตำแหน่งอ้างอิง (x, y, z)
- สำหรับทุก $p_{t1}(x, y, z)$ ที่มีเมฆ แต่ไม่มีเวกเตอร์ชี้ไปยังเพื่อนบ้าน ให้ $n_0(t, r) = 1$

4.2.3 การเคลื่อนตัวของเวกเตอร์แลตทิซ

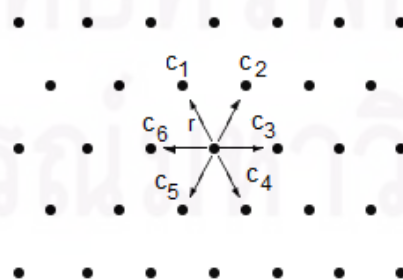
เมื่อกำหนดทิศทางให้แก่ $p_{t1}(x, y, z)$ แล้ว ก็จะปล่อยให้สถานะของเวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงไปตามกฎในวิธีแก๊สแลตทิซของโตมาตา โดยเริ่มแรกจะเคลื่อนตัวออกจากตำแหน่งเดิม (เรียกว่า steaming หรือ propagation) ไปยังตำแหน่งบัพเพื่อนบ้านในทิศทางที่เวกเตอร์ชี้ไป ซึ่งการอัปเดตค่าของเวกเตอร์เพื่อนบ้านที่เวลา $t + 1$ เมื่อไม่เกิดการชนกันที่ลำดับเพื่อนบ้าน i แสดงในสมการที่ 4.6 [10] โดยแสดงตัวดำเนินการของสมการในตารางที่ 4.2

$$\begin{aligned}
 n_i(t + 1, r + c_i) = & n_i(t, r) \wedge \\
 & \{[(n_i \wedge n_{i+1}) \& (n_{i+1} \wedge n_{i+2}) \& (n_{i+2} \wedge n_{i+3}) \\
 & \& (n_{i+3} \wedge n_{i+4}) \& (n_{i+4} \wedge n_{i+5})] \\
 & |[n_i \& n_{i+3} \& \sim (n_{i+1} | n_{i+2} | n_{i+4} | n_{i+5})] \\
 & |[\xi \& n_{i+1} \& n_{i+4} \& \sim (n_i | n_{i+2} | n_{i+3} | n_{i+5})] \\
 & |[\sim \xi \& n_{i+2} \& n_{i+5} \& \sim (n_i | n_{i+1} | n_{i+3} | n_{i+4})]\}
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

ตารางที่ 4.2 สัญลักษณ์ของตัวดำเนินการที่ใช้ในสมการ 4.6

ตัวดำเนินการ	สัญลักษณ์
and	&
or	
xor	^
not	~

c_i ในสมการที่ 4.6 เป็นเวกเตอร์แลตทิซ (lattice vector) หรือบางครั้งเรียกว่าแลตทิซความเร็ว (lattice velocity) ซึ่งเชื่อมต่อกับเพื่อนบ้านลำดับ i ของเวกเตอร์ตำแหน่ง (position vector) r ในบัพที่กำลังพิจารณา ซึ่งแสดงลำดับของเวกเตอร์ c_i ดังรูปที่ 4.12 ฉะนั้นที่เวลา $t + 1$ เวกเตอร์เพื่อนบ้านลำดับที่ i ของ r จะอัปเดตสถานะของทิศทาง i ให้มีค่าเป็น 0 หรือ 1 ตามสถานะของเวกเตอร์แลตทิซในทิศทาง i เดียวกันของเวกเตอร์ r ดังแสดงความสัมพันธ์ของ r , c_i และ n_i ในรูปที่ 4.13 ส่วนตัวประกอบอื่น ๆ ของสมการ 4.6 ใช้ในการพิจารณาสถานะของการชน ซึ่งหากมีการชนเกิดขึ้นสถานะของ $n_i(t + 1, r + c_i)$ จะกลายเป็น 0 (หรือก็คือจะเปลี่ยนทิศ และไม่เคลื่อนไปในทางเดิม) ตามเงื่อนไขการชนซึ่งจะอธิบายเพิ่มเติมในรหัสเทียมของหัวข้อต่อไป ส่วน ξ ในสมการเป็นค่าของบิตที่สุ่มขึ้นมาเพื่อจัดการการชนแบบมีสองอนุภาค



รูปที่ 4.12 ตำแหน่งของเวกเตอร์เพื่อนบ้าน (ในสองมิติ) ของเวกเตอร์แลตทิซ r



รูปที่ 4.13 ภาพแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ r , c_i และ n_i ณ เวลา t (ซ้าย) และ $t + 1$ (ขวา)

4.2.4 การตรวจสอบการชนกัน

ขณะที่เวกเตอร์แลตทิซมีการเคลื่อนตัวในแต่ละขั้นเวลา อาจมีบางเวกเตอร์ที่เข้ามาอยู่ในตำแหน่งทับเดียวกัน ซึ่งในกรณีถือว่ามี การชนกันเกิดขึ้น (collision) โดยกฎการชนในแนวระนาบของวิธีในงานวิจัยจะอ้างอิงกับรูปแบบการชนของวิธีแลตทิซแก้สอโตมาตาชนิด FHP ซึ่งแสดงเป็นรหัสดังรูปที่ 4.14

สำหรับการชนในแนวทแยงเพื่อครอบคลุมการเคลื่อนที่ในสามมิติของเมฆงานวิจัย จะพิจารณาเฉพาะเมื่อมีการชนแบบสองวัตถุ (two-body collision) คือพิจารณาคู่การชนที่อยู่ในทิศทางตรงกันข้ามกัน โดยคู่การชนดังกล่าวได้แก่ (n_7, n_{13}) , (n_8, n_{14}) , (n_9, n_{11}) , (n_{10}, n_{12}) ซึ่งเมื่อเกิดการชนในคู่ใดคู่หนึ่ง ก็จะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนโดยทำการสลับคู่ทิศทางคือ $(n_7, n_{13}) \leftrightarrow (n_8, n_{14})$ และ $(n_9, n_{11}) \leftrightarrow (n_{10}, n_{12})$

สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวทแยงที่เกินขอบเขตของขนาดกริด จะทำการเปลี่ยนสถานะของ $n_i(t, r + c_i)$ ไปในทิศทางใหม่ในแนวระดับโดยการฉายลงบนแกน Y ดังนั้นค่าใหม่ที่ทับเพื่อนบ้านของ r หากมีการชนจะอัปเดตตำแหน่ง $(x_{c_i}, y_{c_i}, z_{c_i}, t + 1)$ ดังกล่าวด้วยค่าใหม่ดังสมการที่ 4.7 โดยค่า I_i และ K_i อ้างอิงจากตารางที่ 4.1

$$n_i(x_{c_i}, y_{c_i}, z_{c_i}, t + 1) = n_i(x + I_i, y = 0, z + K_i, t) \quad 4.7$$

```

2.   FOR every x
3.     FOR every y
4.       FOR every z
5.         a = Get vector value from  $n_0(x, y, z)$ 
6.         b = Get vector value from  $n_1(x, y, z)$ 
7.         c = Get vector value from  $n_2(x, y, z)$ 
8.         d = Get vector value from  $n_3(x, y, z)$ 
9.         e = Get vector value from  $n_4(x, y, z)$ 
10.        f = Get vector value from  $n_5(x, y, z)$ 
12.        //if there are particles in cells (a&d) or (b&e) or (c&f)
13.        //and have no particles in other cells
14.        //this is the condition of two-body collision of FHP-model
15.        db1 = Calculate (a&d&~(b|c|e|f))
16.        db2 = Calculate (b&e&~(a|c|d|f))
17.        db3 = Calculate (c&f&~(a|b|d|e))
18.        // this is the condition of three-body collision of FHP-model
19.        triple = Calculate (a^b)&(b^c)&(c^d)&(d^e)&(e^f)
20.        //random bit for condition of two-body collision
21.        xi = Random
22.        noxi = ~xi
23.        //every neighboring node of this (x, y, z) will be changed
24.        //by this condistion
25.        cha = Calculate ((triple|db1|(xi&db2)|(noxi&db3)))
26.        chd = Calculate ((triple|db1|(xi&db2)|(noxi&db3)))
27.        chb = Calculate ((triple|db2|(xi&db3)|(noxi&db1)))
28.        che = Calculate ((triple|db2|(xi&db3)|(noxi&db1)))
29.        chc = Calculate ((triple|db3|(xi&db1)|(noxi&db2)))
30.        chf = Calculate ((triple|db3|(xi&db1)|(noxi&db2)))
31.         $n_0(x, y, z, t + 1) = a^{cha}$ 
32.         $n_1(x, y, z, t + 1) = b^{chb}$ 
33.         $n_2(x, y, z, t + 1) = c^{chc}$ 
34.         $n_3(x, y, z, t + 1) = d^{chd}$ 
35.         $n_4(x, y, z, t + 1) = e^{che}$ 
36.         $n_5(x, y, z, t + 1) = f^{chf}$ 
37.       END FOR
38.     END FOR
39.   END FOR

```

รูปที่ 4.14 ภาพรหัสเทียมของการชนในวิธีแลตทิซแก๊สอโตมาตาชนิด FHP

4.2.5 การคำนวณค่าสีของเมฆจากบัพในแลตทิซ

สำหรับค่าสีของเมฆในแต่ละชั้นเวลาที่ตำแหน่ง $p_{t+1}(x, y, z)$ จะทำการคำนวณตามสมการที่ 4.8 และ 4.9 โดยถ้า $C_{t+1}(x, y, z) = 0$ แสดงว่าที่ตำแหน่งดังกล่าวมีเวกเตอร์เพียงเวกเตอร์เดียว ถ้า $C_{t+1}(x, y, z) < 0$ แสดงว่าไม่มีเวกเตอร์ใด ๆ ในตำแหน่งดังกล่าว ถ้า $C_{t+1}(x, y, z) > 0$ แสดงว่ามีเวกเตอร์มากกว่า 1 ตัวในบริเวณดังกล่าว และให้ N เป็นจำนวนบัพของเพื่อนบ้านที่นำมาพิจารณา

$$C_{t+1}(x, y, z) = \frac{[\sum_{i=0}^N n_i(t+1, r)] - 1}{N + 1} \quad 4.8$$

$$p_{t+1}(x, y, z) = \begin{cases} C_{t+1}(x, y, z), & C_{t+1}(x, y, z) > 0 \\ p_t(x, y, z), & C_{t+1}(x, y, z) = 0 \\ p_t(x, y, z)/2, & C_{t+1}(x, y, z) < 0 \end{cases} \quad 4.9$$

4.2.6 ตารางที่นำมาประกอบการพิจารณาเมื่อมีการเคลื่อนที่

นอกจากวิธีการทางแลตทิซขอโตมาตาข้างต้นที่กล่าวมาแล้ว งานวิจัยฯ ได้สร้างตารางสำหรับประกอบการพิจารณาการเคลื่อนที่ของเมฆเพิ่มเติม ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของเมฆสามารถเกิดขึ้นใหม่ และหายไปได้ตลอดเวลา ซึ่งตารางที่นำมาพร้อมพิจารณากับขั้นตอนที่ผ่านมามีดังต่อไปนี้

4.2.6.1 ตารางแสดงคุณสมบัติของเซลล์

การกำหนดคุณสมบัติของเซลล์ด้วยค่าในตารางนี้ จะใช้สถานะที่ประกอบด้วยบิต 3 บิต ซึ่งมีทั้งหมด 8 สถานะ โดยจะใช้ตารางที่ 4.3 เพื่อบ่งบอกคุณสมบัติของเซลล์แต่ละเซลล์ในกริดสามมิติของเมฆตามที่นิยามไว้

ตารางที่ 4.3 นิยามคุณสมบัติของเซลล์ในกริดสำหรับเป็นค่าในตาราง

ค่าบิต	คุณสมบัติของเซลล์
000	บริเวณโดยรอบดังกล่าวว่างเสมอ และไม่ปรากฏเมฆตำแหน่งเซลล์นั้นเมื่อเวลา t_2
001	บริเวณโดยรอบดังกล่าวว่างเสมอ แต่ปรากฏเมฆที่ตำแหน่งเซลล์นั้นเมื่อเวลา t_2
010	บริเวณดังกล่าวมีเมฆเคลื่อนเข้ามาหรือเกิดเมฆขึ้นใหม่ แต่ไม่ปรากฏเมฆที่ตำแหน่งเซลล์นั้นเมื่อเวลา t_2
011	บริเวณดังกล่าวมีเมฆเคลื่อนเข้ามาหรือเกิดเมฆขึ้นใหม่ และปรากฏเมฆที่ตำแหน่งเซลล์นั้นเมื่อเวลา t_2
100	เมฆบริเวณดังกล่าวเคลื่อนออกไปหรือสลายตัว และไม่ปรากฏเมฆตำแหน่งเซลล์นั้นเมื่อเวลา t_2

101	เมฆบริเวณดังกล่าวเคลื่อนออกไปหรือสลายตัว แต่ปรากฏเมฆที่ตำแหน่งเซลล์นั้นเมื่อเวลา t_2
110	บริเวณโดยรอบดังกล่าวเต็มเสมอ แต่ไม่ปรากฏเมฆที่ตำแหน่งเซลล์นั้นเมื่อเวลา t_2
111	บริเวณโดยรอบดังกล่าวเต็มเสมอ และปรากฏเมฆที่ตำแหน่งเซลล์นั้นเมื่อเวลา t_2

สำหรับสองบิตแรกของตารางที่ 4.3 จะเปรียบเทียบการเพิ่มลดของปริมาณเมฆในแต่ละช่วงเวลาตามพื้นที่ ๆ แบ่งไว้ เพื่อดูแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของแต่ละบริเวณ ซึ่งนำสัดส่วนปริมาณเมฆโดยรวม $G_{t_1}(m)$ และ $G_{t_2}(m)$ ของขนาดการแบ่งพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งมาใช้ โดยในที่นี้จะใช้เป็น $G_{t_1}(m)''$ และ $G_{t_2}(m)''$ (ดูที่หัวข้อ 4.2.2.2) และจะนำค่าที่ได้ดังกล่าวมาเป็นเงื่อนไขกำหนดค่าให้กับสองบิตแรกตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงการพิจารณาสถานะของ 2 บิตแรกใน ของแต่ละเซลล์

เงื่อนไขของ $G_{t_1}(m)$ และ $G_{t_2}(m)$	ค่าบิตของ 2 บิตแรก
$G_{t_1}(m) > 0.9$ และ $G_{t_2}(m) > 0.9$ (เต็ม->เต็ม)	11
$G_{t_1}(m) < 0.1$ และ $G_{t_2}(m) < 0.1$ (ว่าง->ว่าง)	00
$G_{t_2}(m) - G_{t_1}(m) > 0$ (เพิ่มขึ้น)	01
$G_{t_2}(m) - G_{t_1}(m) < 0$ (ลดลง)	10

สำหรับบิตสุดท้ายของแต่ละเซลล์ในตารางที่ 4.3 ให้พิจารณาจากค่า $p_{t_2}(x, y, z)$ โดยเปรียบเทียบค่าวิกฤตของการแสดงความเป็นเมฆที่กำหนดขึ้น โดยในที่นี้ได้กำหนดให้เท่ากับ 0.1 ซึ่งหาก $p_{t_2}(x, y, z) > 0.1$ แสดงว่าที่ตำแหน่งดังกล่าวเมื่อเวลา t_2 มีเมฆปรากฏขึ้น จึงให้บิตสุดท้ายดังกล่าวมีค่าเป็น 1 แต่หาก $p_{t_2}(x, y, z) < 0.1$ ให้ถือว่าตำแหน่งดังกล่าวไม่มีเมฆปรากฏขึ้นเมื่อเวลา t_2 ซึ่งจะให้บิตสุดท้ายมีค่าเป็น 0

4.2.6.2 ตารางการหดหายหรือขยายตัวของเมฆ

สำหรับตารางนี้ในขั้นแรกจะกำหนดให้ทุกบัพที่มีเวกเตอร์มีค่าประจำบิตเป็น 11 และมีเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนสถานะของแต่ละบัพ โดยการพิจารณาคุนสมบัติของแต่ละเซลล์ใด ตารางที่ 4.3 ร่วมกับตารางที่ 4.5 ซึ่งแทนค่าประจำบิตของเวกเตอร์ที่บัพ และนำไปเปรียบเทียบเพื่ออัปเดตค่าของ $p_{t+1}(x, y, z)$ ใหม่ตามเงื่อนไขสถานะเวกเตอร์ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ตารางคุณสมบัติภายในของเวกเตอร์แลตทิซ

บิตแสดงคุณสมบัติ	นิยามคุณสมบัติ
00	ว่างจากความเป็นเมฆ (ไม่มีเวกเตอร์)
01	กำลังเปลี่ยนสถานะ แต่ไม่แสดงความเป็นเมฆ
11	แสดงความเป็นเมฆ
10	กำลังเปลี่ยนสถานะ และแสดงความเป็นเมฆ

ตารางที่ 4.6 ตารางการอัปเดตสถานะของเวกเตอร์โดยการเปรียบเทียบกับตารางคุณสมบัติของเซลล์

		คุณสมบัติของเวกเตอร์ตามตารางที่ 4.5			
		00	01	10	11
คุณสมบัติของเซลล์ตามตารางที่ 4.3	000	00	00	01	10
	111	01	10	11	11
	100	00	00	01	10
	101	01	01	10	10
	010	01	00	11	10
	011	01	10	11	11
	001	01	10	01	10
	110	01	10	01	10

4.2.6.3 การอัปเดตสถานะของเวกเตอร์โดยเปรียบเทียบกับสถานะของเวกเตอร์ในเวลาที่ผ่านมา

สำหรับกรณีนี้จะเป็นขั้นตอนการอัปเดตสถานะของเวกเตอร์ ณ เวลา $t + 1$ ซึ่งมีคุณสมบัติหรือค่าประจำบิตเช่นเดียวกับในตารางที่ 4.5 โดยนำมาพิจารณาเปรียบเทียบค่าของเวกเตอร์ $n_i(t + 1, r + c_i)$ ที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่หรือการชนของเวกเตอร์แลตทิซ กับสถานะในตารางคุณสมบัติของเวกเตอร์ (ตารางที่ 4.5) ที่ตำแหน่งเดียวกันเมื่อเวลา t เพื่อใช้ในการเปลี่ยนแปลงการเพิ่มลดของปริมาณเมฆนอกเหนือจากการเคลื่อนที่และการชน โดยแสดงเงื่อนไขการอัปเดตสถานะใหม่ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ตารางสถานะใหม่ของเวกเตอร์ที่เวลา $t + 1$ โดยเปรียบเทียบกับสถานะของเวกเตอร์ในเวลา t

เวกเตอร์ตำแหน่งที่ i เมื่อเวลา t	$n_i = 0$ เมื่อเวลา $t + 1$	$n_i = 1$ เมื่อเวลา $t + 1$
00	00	01
01	00	10
10	01	11
11	10	11

4.2.6.1 การสุ่มการเพิ่มลดปริมาณเมฆในแต่ละช่วงเวลา

สำหรับวิธีการนี้จะหาตำแหน่งที่ไม่มีเมฆของ $p_{t1}(x, y, z)$ กับตำแหน่งที่มีเมฆของ $p_{t2}(x, y, z)$ เพื่อสุ่มอนุภาคของเมฆใหม่ขึ้นมาเมื่อเวลาผ่านไป และหาตำแหน่งที่มีเมฆของ $p_{t1}(x, y, z)$ กับตำแหน่งที่ไม่มีเมฆของ $p_{t2}(x, y, z)$ เพื่อสุ่มอนุภาคเมฆที่จะหายไปเมื่อเวลาผ่านไป

4.2.7 ลำดับขั้นตอนการเคลื่อนที่ของเมฆในแต่ละขั้นเวลา

การพิจารณาการเคลื่อนที่ของเมฆตามขั้นเวลาที่เปลี่ยนไป จะพิจารณาตามกระบวนการหาทิศทางเริ่มต้นของเวกเตอร์ในระบบ (4.2.2), พิจารณาเคลื่อนตัวของอนุภาคภายในแลตทิซ (4.2.3), ตรวจสอบเงื่อนไขการชนกันและเปลี่ยนทิศทางไปยังตำแหน่งใหม่ (4.2.4) แล้วคำนวณค่าของบัพเพื่อหาค่าสีของเมฆในขั้นเวลาดังกล่าว (4.2.5) ซึ่งในบางช่วงเวลาจะนำเอาตารางในหัวข้อที่ 4.2.6 มาพิจารณาร่วมเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงสถานะของเวกเตอร์ เพื่อครอบคลุมถึงการหดหายและขยายเพิ่มของเมฆในตำแหน่งต่าง ๆ ที่ไม่สัมพันธ์กับกฎการเคลื่อนที่ของแลตทิซแก๊สอโตมาตา ซึ่งในขั้นตอนการทดลองของงานวิจัยฯ ผู้วิจัยได้เลือกวิธีการในหัวข้อที่ 4.2.6.1 การสุ่มการเพิ่มลดปริมาณเมฆในแต่ละช่วงเวลา มาใช้เปลี่ยนสถานะของเมฆคือก่อตัวใหม่หรือสลายตัว หลังจากเมฆมีการเคลื่อนที่และชนกัน

บทที่ 5

การทดลองและวิเคราะห์ผล

งานวิจัยการสร้างภาพเคลื่อนไหวเมฆในสามมิติโดยใช้คอมพิวเตอร์กราฟิกส์แบบเรียลไทม์เพื่อเสนอวิธีการสร้างภาพเคลื่อนไหวสามมิติของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียมเพื่อนำไปใช้ในการสร้างมโนภาพของเมฆและชั้นบรรยากาศของโลก โดยกำหนดให้รูปลักษณะโดยรวมของภาพสามมิติคล้ายคลึงกับภาพถ่ายดาวเทียมที่เป็นต้นฉบับ แต่สามารถขยายมุมมองได้มากขึ้น มีรายละเอียดของเมฆที่ชัดเจน มีความรวดเร็วในการประมวลผล และสามารถสร้างภาพเคลื่อนไหวที่เหมาะสมกับเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียมต้นทางไปยังภาพถ่ายดาวเทียมปลายทาง ซึ่งแบ่งผลจากการทดลองเป็น 2 ส่วนได้แก่ ผลการสร้างแบบจำลองเมฆในระบบสามมิติ และผลการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆ

งานวิจัยฯ ได้พัฒนาโปรแกรมขึ้นเพื่อทดลองวิธีการทั้งสองส่วน โดยวิธีการใช้งานของโปรแกรม อธิบายในภาคผนวก โปรแกรมดังกล่าวพัฒนาขึ้นด้วยภาษา C#.net และใช้ไลบรารีของ SlimDX [29] และ Ogre [30] เป็นส่วนแสดงผลสามมิติของเมฆ

5.1 ผลการจำลองเมฆในระบบสามมิติ

ผลการทดลองวิธีที่ใช้สร้างแบบจำลองของเมฆในระบบสามมิติ เริ่มตั้งแต่ขั้นแบ่งส่วนภาพถ่ายดาวเทียมเพื่อเตรียมเป็นข้อมูลสำหรับสร้างภาพสามมิติ ไปจนถึงการแสดงผลตัวแปรที่เหมาะสม และข้อจำกัดของวิธีการจะอธิบายไว้ในหัวข้อนี้ตามลำดับ

5.1.1 การแบ่งส่วนภาพถ่ายดาวเทียม

การแบ่งส่วนของภาพถ่ายดาวเทียมทั้งสองชนิดคือภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้ และภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรด มีวิธีการแบ่งส่วนที่ต่างกันเล็กน้อย ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.1.1 ซึ่งภาพถ่ายดาวเทียมแต่ละชนิดมีทั้งข้อดีและข้อจำกัดที่ไม่เหมือนกัน

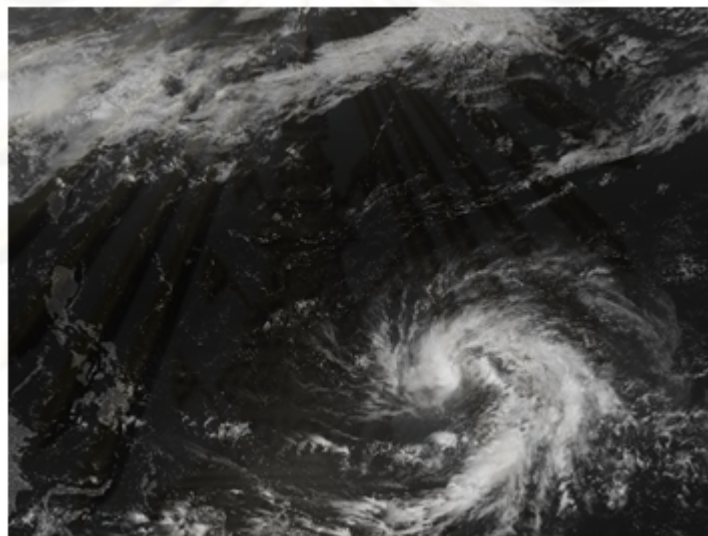
จากผลการทดลองนำเข้าภาพถ่ายดาวเทียมทั้งสองชนิด ไม่มีความแตกต่างกันมาก เนื่องจากได้ปรับขั้นตอนวิธีการให้เหมาะกับดาวเทียมแต่ละชนิด อย่างไรก็ตามภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้จะแสดงรายละเอียดของชั้นเมฆที่ชัดเจนต่อสายตาค่อนข้างกว่าดาวเทียมชนิดอินฟราเรดเล็กน้อย แต่ก็สามารถบันทึกได้เพียงช่วงเวลาที่มิใช่อาทิตย์เท่านั้น การเลือกใช้ภาพถ่ายดาวเทียมประเภทอื่นนอกเหนือไปจากสองประเภทที่นำมาทดลอง หากสามารถแบ่งส่วนภาพเมฆเป็นชั้นได้ชัดเจนก็สามารถนำมาใช้สร้างภาพสามมิติของเมฆได้เช่นกัน

5.1.1.1 ผลการแบ่งส่วนย่อยของภาพถ่ายดาวเทียมเมฆชนิดสามารถเห็นได้

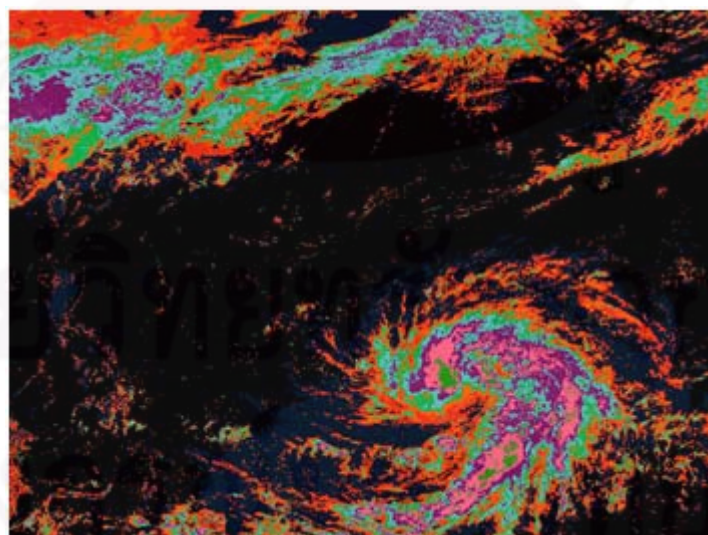
ในการทดลองได้กำหนดค่าสีของ k_1 เท่ากับ 10 (ในสเกลของสเกลสีเทา 255 ค่า) เพื่อแบ่งส่วนที่เป็นพื้น และการใช้ภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้ มีข้อดีและข้อจำกัดดังนี้

ข้อดี – ภาพเมฆที่แบ่งส่วนได้มีความชัดเจน

ข้อจำกัด – หากบริเวณดังกล่าวมีแสงสะท้อนจากพระอาทิตย์ ในกรณีที่พระอาทิตย์ทำมุมกับดาวเทียม จะทำให้สีภาพบางส่วนสว่างมากกว่าความเป็นจริง ซึ่งอาจทำให้พื้นบางส่วนถูกแปลความหมายว่าเป็นเมฆได้



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้



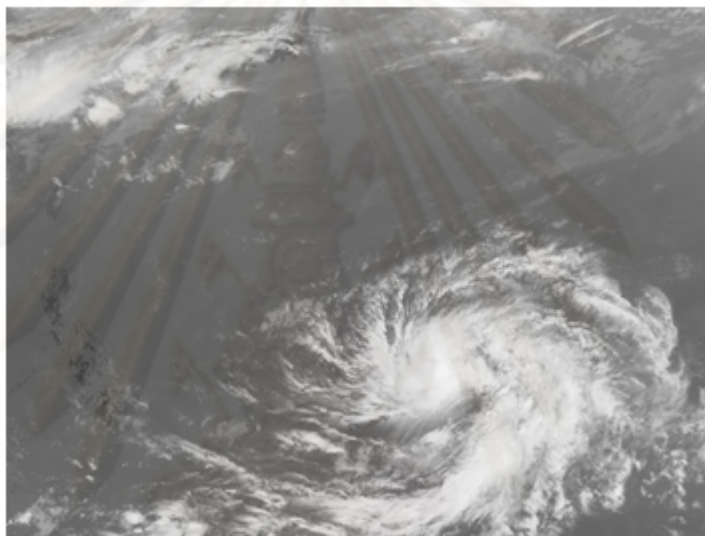
รูปที่ 5.2 ตัวอย่างผลการแบ่งส่วนภาพของภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้

5.1.1.2 การแบ่งส่วนย่อยของภาพถ่ายดาวเทียมเมฆชนิดอินฟราเรด

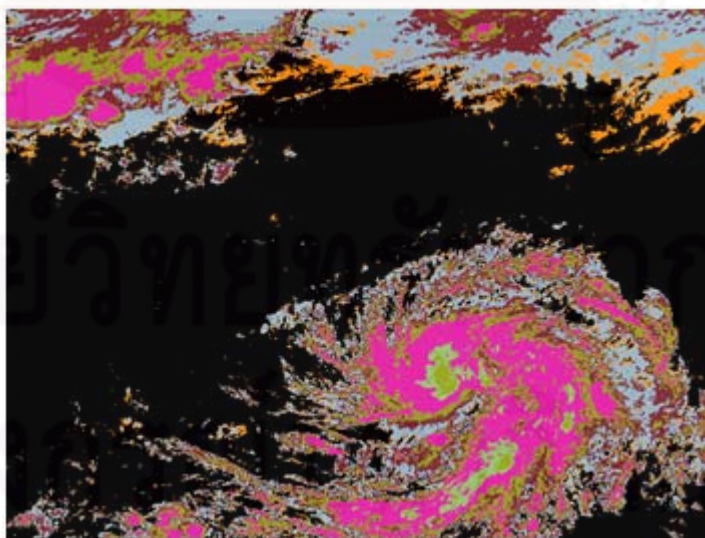
ในการทดลองได้กำหนดค่าสีของ k_2 เท่ากับ 122 (ในสเกลของสเกลสีเทา 255 ค่า) เพื่อแบ่งส่วนที่เป็นพื้น และการใช้ภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรด มีข้อดีและข้อจำกัด ดังนี้

ข้อดี – สีของภาพไม่มีผลกระทบจากแสงของพระอาทิตย์ จึงสามารถบันทึกได้ ทั้งกลางวันและกลางคืน

ข้อจำกัด – การแบ่งส่วนของเมฆด้วยวิธีการใช้ค่าสี จะได้ส่วนที่เป็นเมฆชัดเจนน้อยกว่าการใช้ภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้



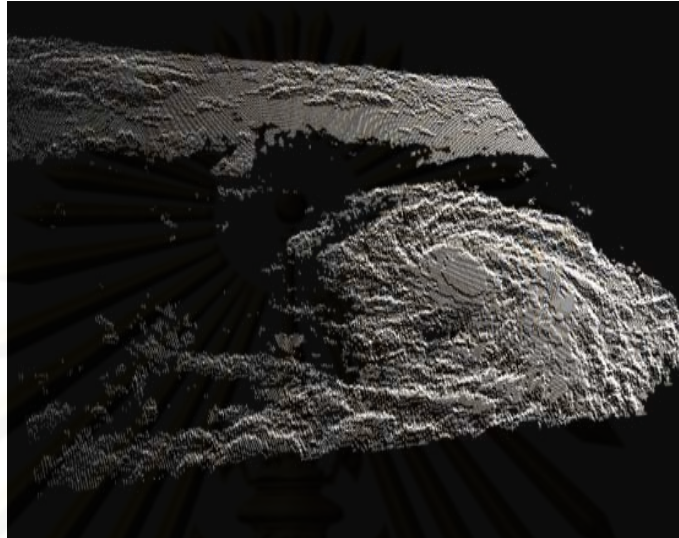
รูปที่ 5.3 ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรด



รูปที่ 5.4 ตัวอย่างผลการแบ่งส่วนภาพของภาพถ่ายดาวเทียมชนิดอินฟราเรด

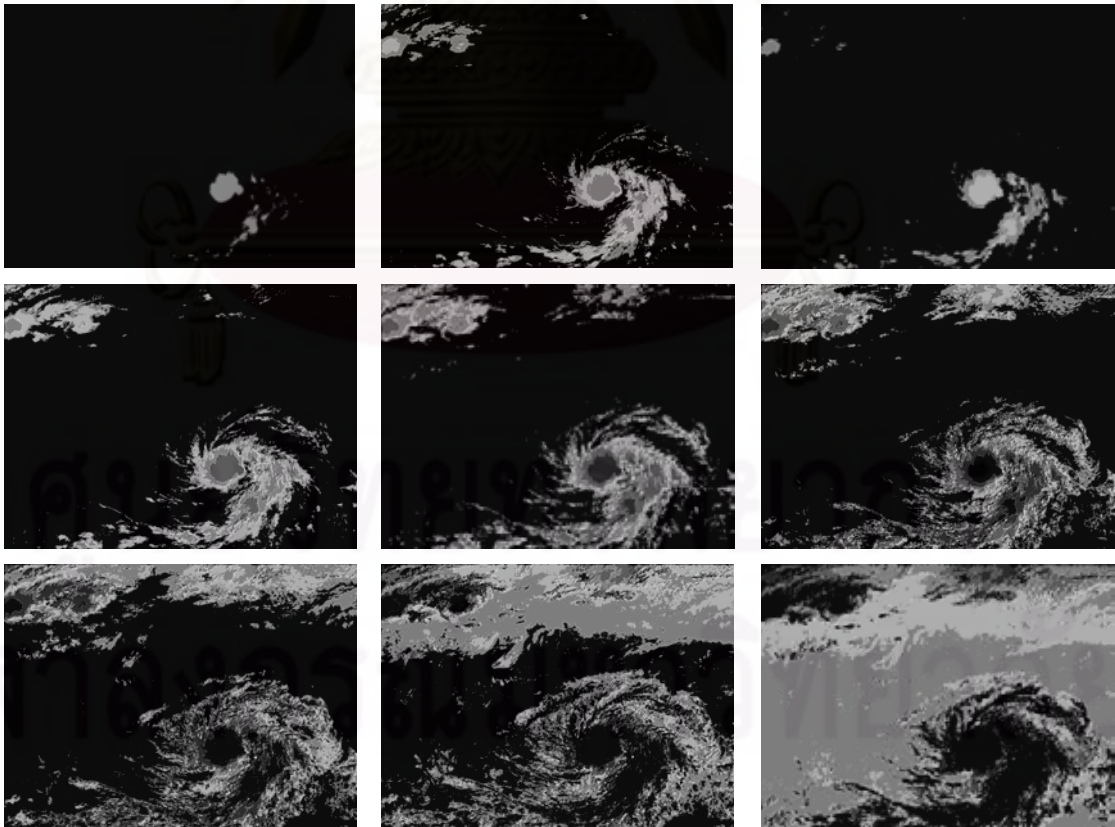
5.1.2 การกำหนดชั้นเมฆของเมฆในสามมิติ

ข้อมูลของชั้นเมฆในสามมิติ $S(x, y, z)$ ที่กำหนดค่า C แล้วแสดงเป็นภาพ ตัวอย่างในรูปที่ 5.5 ซึ่งทุกจุดของ x, y, z จะมีค่าเท่ากับ 0 หรือเท่ากับ C เท่านั้น



รูปที่ 5.5 ตัวอย่างการชั้นของเมฆที่ถูกจำแนก และวางตัวเป็นระดับในปริภูมิสามมิติ

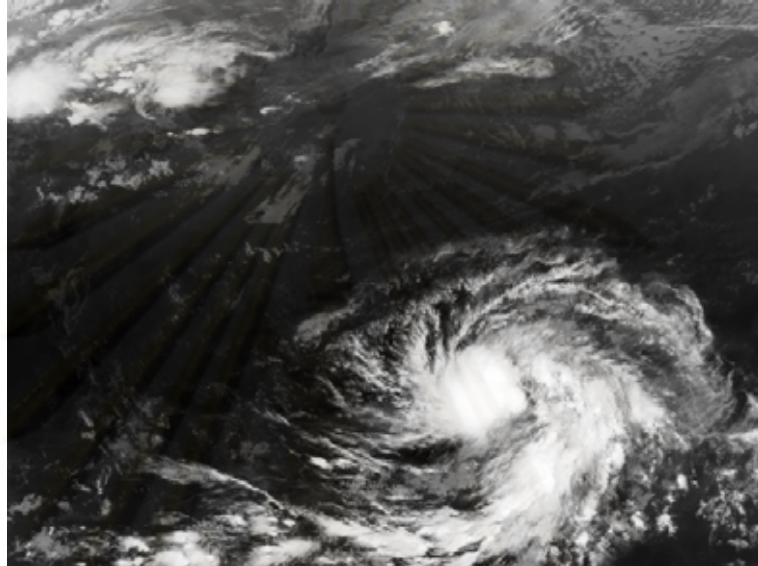
5.1.3 ตัวอย่างชั้นย่อยของเมฆที่ถูกสร้างใหม่จากวิธีการในงานวิจัย



รูปที่ 5.6 แสดงตัวอย่างชั้นย่อยของเมฆสามมิติ $P(x, y, z)$ ที่ถูกสร้างขึ้นจากวิธีการในงานวิจัย

5.1.4 ผลการจำลองภาพสามมิติของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียม

ในงานวิจัยได้นำภาพถ่ายดาวเทียมที่มีลักษณะของเมฆที่แตกต่างกันในรูปแบบต่าง ๆ มาทำการทดสอบวิธีการสร้างภาพจำลองของเมฆในสามมิติ โดยสองตัวอย่างที่นำมาแสดงเป็นภาพถ่ายดาวเทียมที่เมฆค่อนข้างมีรูปแบบซับซ้อน ซึ่งน่าจะครอบคลุมรูปแบบของเมฆส่วนใหญ่

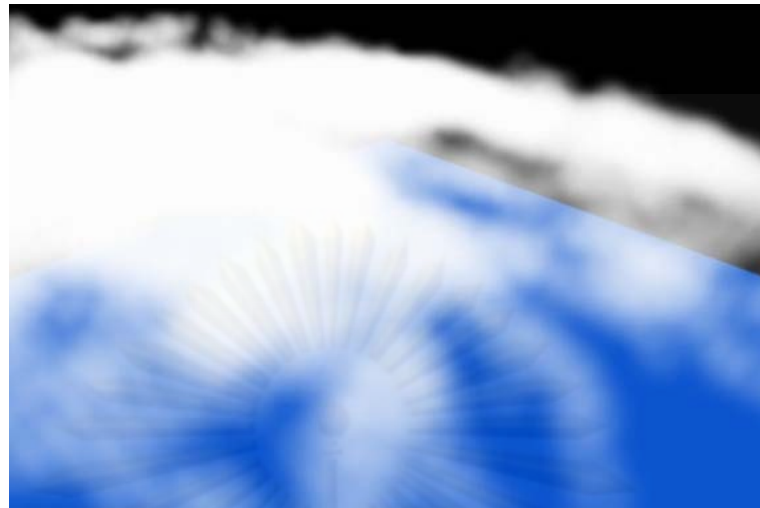


รูปที่ 5.7 ภาพตัวอย่างของภาพถ่ายดาวเทียมที่นำมาใช้ในการทดสอบวิธีการ



(ก)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ข)

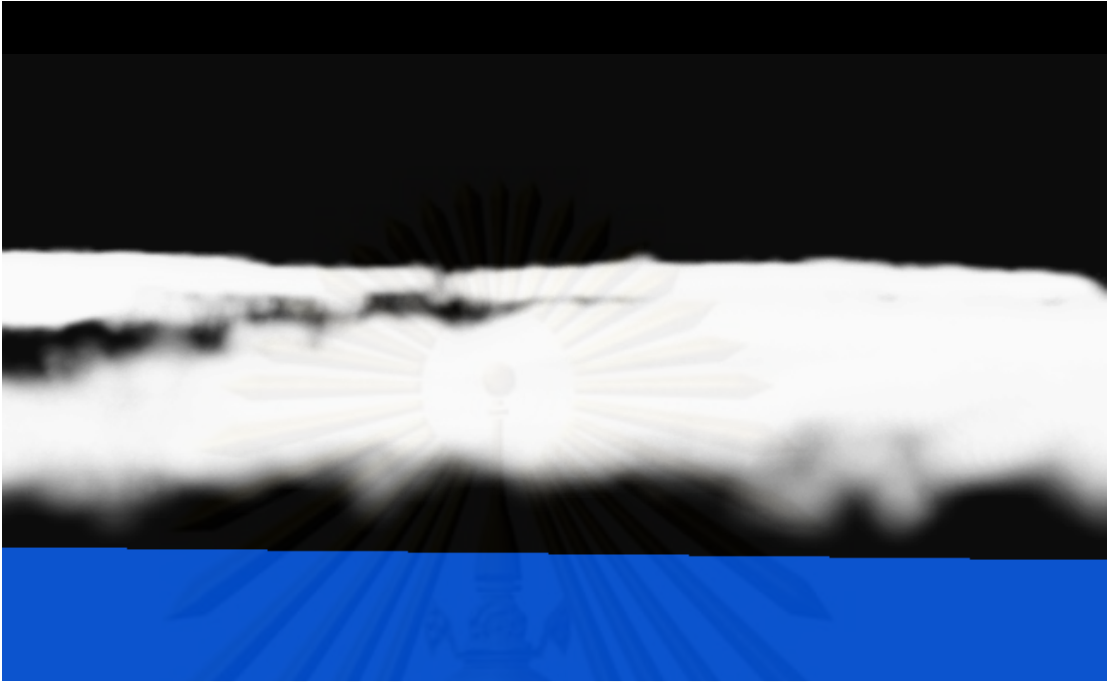


(ค)

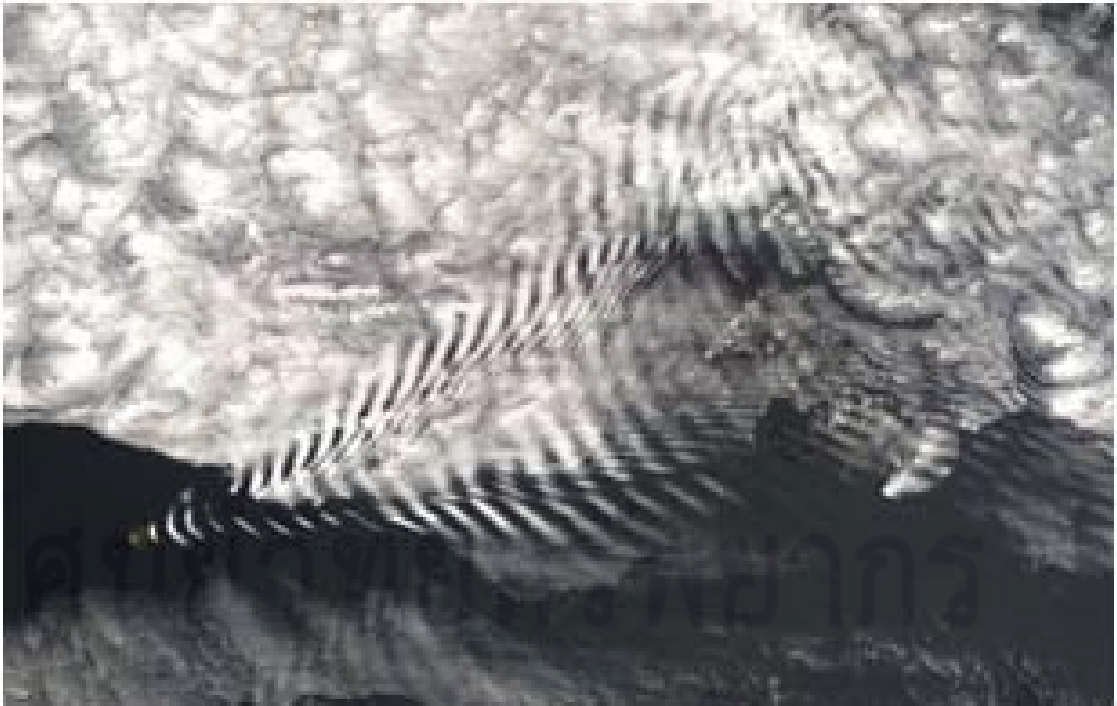


(ง)

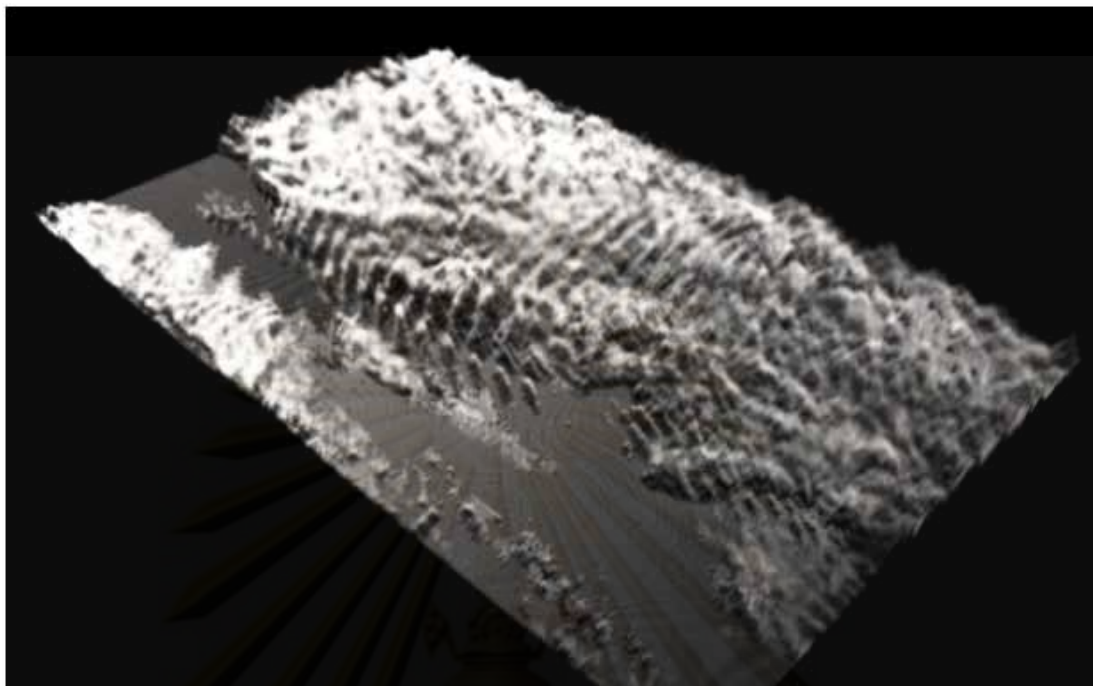
รูปที่ 5.8 ภาพสามมิติของเมฆที่สร้างโดยวิธีในงานวิจัย ของภาพถ่ายดาวเทียมในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.9 ภาพสามมิติซึ่งแสดงด้านที่เป็นส่วนหน้าของเมฆจากการทดลองด้วยวิธีในงานวิจัยฯ



รูปที่ 5.10 ภาพถ่ายดาวเทียมของเมฆจากเว็บไซต์วิกิพีเดีย



รูปที่ 5.11 ภาพสามมิติของเมฆที่สร้างโดยวิธีในงานวิจัยฯ ของภาพถ่ายดาวเทียมในรูปที่ 5.10

5.1.5 ตัวแปรที่เหมาะสมในสมการ

ตัวแปรในสมการที่ 4.1 และ 4.2 ที่เหมาะสมซึ่งจะทำให้ได้ผลลัพธ์ภาพสามมิติของเมฆไม่ผิดเพี้ยน ขณะกำหนดให้ค่าน้ำหนัก w ของเพื่อนบ้านที่อยู่ติดกันในด้านบนและข้างเคียงแต่ละจุด x, y, z เท่ากับ 1 ($w = 1$) จะได้ค่าของ a, b และ $1/h$ จากการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งโดยสรุปจากข้อมูลทั้งหมดค่าที่เหมาะสมของค่า a ต้องอยู่ในระหว่าง 3 ถึง 6 ค่า b สามารถมากกว่าค่า $a + 1$ เป็นต้นไป ส่วนค่า h จะต้องมากกว่า 3 เสมอจึงจะได้ผลลัพธ์ที่ดีในการแสดงผลภาพสามมิติของเมฆด้วยวิธีในงานวิจัยฯ

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างการทดลองหาค่าที่เหมาะสมของ a, b และ $1/h$ เมื่อค่า w ในตำแหน่งเพื่อนบ้านที่อยู่ติดกันเท่ากับ 1

ตัวอย่างที่	a	b	$1/h$ ที่สามารถใช้ได้	$1/h$ ที่เหมาะสม
1	3	มากกว่า 4	น้อยกว่า $1/3$	$1/6$
2	4	มากกว่า 5	น้อยกว่า $1/3$	$1/6$
3	5	มากกว่า 6	น้อยกว่า $1/3$	$1/5$
4	6	มากกว่า 7	น้อยกว่า $1/3$	$1/5$

อย่างไรก็ตามหาก $1/h$ ยังมีค่าน้อยหรือ b ยังมีค่ามาก จะทำให้ค่าของปริมาณเมฆในชั้นที่ถูกสร้างขึ้นใหม่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับตำแหน่งเมฆที่อยู่ด้านบนซึ่งนำมาใช้อ้างอิง สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าต่าง ๆ ในสมการตั้งที่กล่าวมา จะไม่ทำให้รูปทรงของเมฆที่แสดงในสามมิติโดยรวมแตกต่างกันมากนัก ซึ่งความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวของแปรจะมีเพียงรายละเอียดของเมฆในจุดต่าง ๆ ของภาพ รวมถึงความชัดเจนของเมฆหรือความคมชัดของสีเมฆในการแสดงผลเท่านั้น

5.1.6 ความเร็วในการประมวลผล

การจับเวลาเพื่อทดสอบความเร็วในสร้างภาพสามมิติของเมฆด้วยวิธีในงานวิจัยฯ ได้ทดสอบกับคอมพิวเตอร์ ความเร็วซีพียู Core2 Duo 2.26 GHz ขนาดหน่วยความจำแรม 3 GB บนระบบปฏิบัติการ Windows 7 ซึ่งแสดงความเร็วโดยประมาณและคุณภาพความละเอียดของภาพดังตารางที่ 5.2

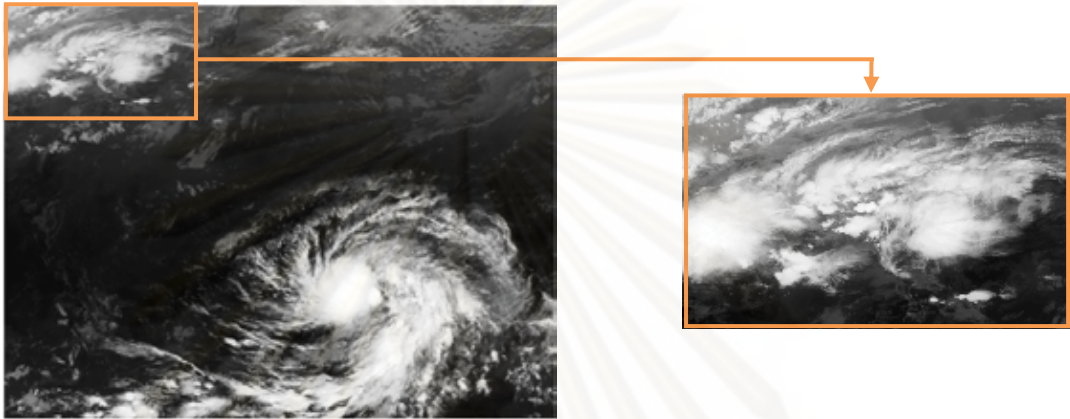
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบความเร็วในการประมวลผล และคุณภาพของภาพสามมิติของเมฆที่ได้จากการทดลอง

ขนาดภาพ (กว้าง x ยาว x สูง)	เวลาที่ใช้ประมวลผล	คุณภาพ (ความละเอียด)
120x90x8 (86,400)	น้อยกว่า 0.1 วินาที	ดี
240x180x8 (345,600)	น้อยกว่า 0.5 วินาที	ดีมาก
360x270x8 (777,600)	น้อยกว่า 1.0 วินาที	ดีมาก
640x480x8 (2,457,600)	ประมาณ 1 วินาที	ดีมาก
240x180x24 (1,036,800)	ประมาณ 1 วินาที	ผลส่วนท้องเมฆไม่ดีนัก เนื่องจากจำนวนชั้นมากเกินไป

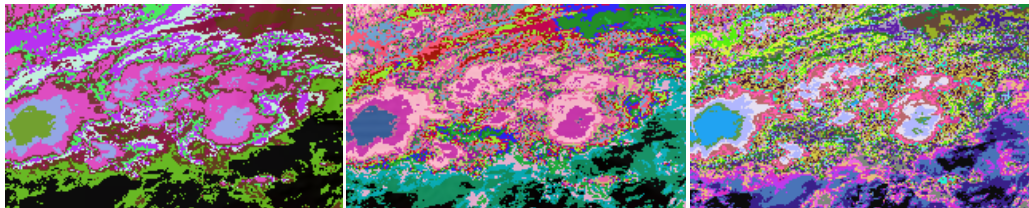
จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วในการสร้างข้อมูลสามมิติของเมฆขึ้นอยู่กับขนาดของภาพและจำนวนชั้นที่ต้องการสร้างให้เป็นส่วนสูงของเมฆ แต่อย่างไรก็ดีการแสดงผลของภาพเมฆในสามมิติ จะมีความสวยงามมากน้อยหรือเร็วช้าขึ้นอยู่กับภาษาและเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมเป็นสำคัญ อาทิเช่น ไลบรารี SlimDX ที่พัฒนาด้วยวิธีแสดงภาพผ่าน Shading จะแสดงผลได้เร็วกว่าไลบรารี Ogre ที่พัฒนาด้วยวิธีแสดงภาพผ่าน Billboard แต่มีความสวยงามในการแสดงผลด้อยกว่าเป็นต้น

5.1.7 ข้อจำกัดของวิธีการ

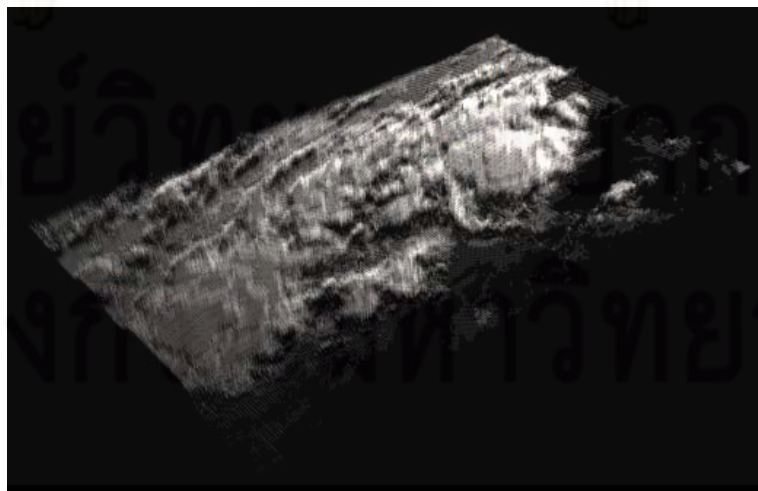
สำหรับข้อจำกัดของวิธีการ ได้แสดงโดยการตัดบางส่วนของภาพถ่ายดาวเทียมชนิดสามารถเห็นได้ มาทำการแบ่งภาพด้วยวิธีของงานวิจัย ก่อนนำไปจำลองภาพสามมิติของเมฆ ซึ่งแสดงตัวอย่างส่วนที่ถูกตัดมาทำการทดลองดังรูปที่ 5.12 ทั้งนี้เนื่องจากจะสามารถมองเห็นรายละเอียดของส่วนที่ผิดพลาดได้ชัดเจนยิ่งขึ้น



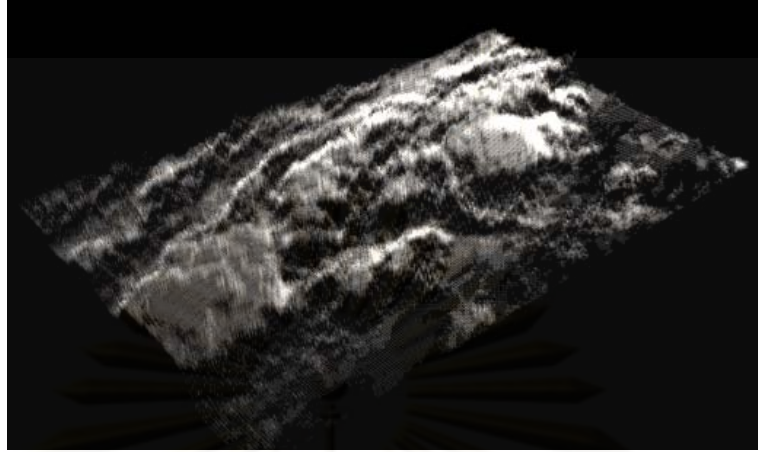
รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายดาวเทียมตัวอย่าง และส่วนของภาพที่นำมาทดสอบ



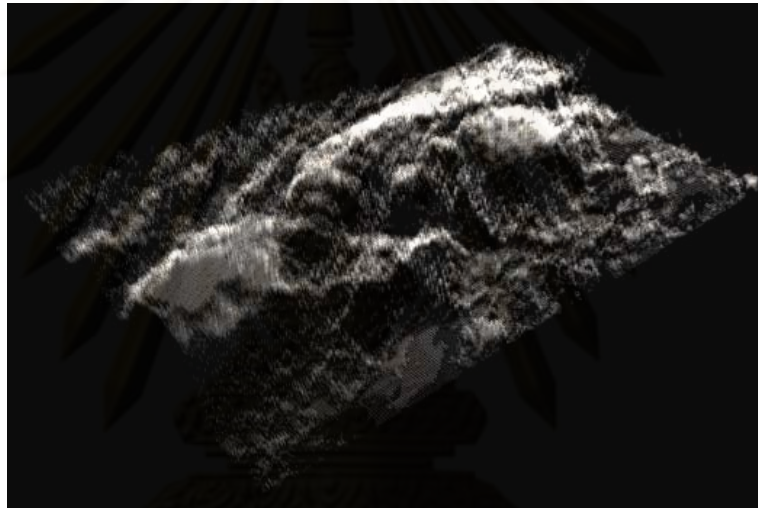
รูปที่ 5.13 ตัวอย่างการแบ่งส่วนเมฆในภาพถ่ายดาวเทียม โดยภาพซ้ายเป็นการแบ่ง 10 ส่วน ภาพกลางเป็นการแบ่ง 20 ส่วน และภาพขวาเป็นการแบ่ง 36 ส่วน



(ก) 10 ชั้นย่อย



(ข) 20 ชั้นย่อย



(ค) 36 ชั้นย่อย



(ง) ตัวอย่างส่วนที่ผิดปกติ

รูปที่ 5.14 ตัวอย่างผลที่ไม่ถูกต้องในการจำลองภาพสามมิติด้วยวิธีการของงานวิจัย

ตัวอย่างที่แสดงเป็นข้อจำกัดที่สำคัญของวิธีการ จากรูปที่ 5.14 (ง) เมื่อแบ่งชั้นย่อยเป็น 36 ส่วน การเพิ่มจำนวนชั้นที่มากขึ้นจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างจุดสีของแต่ละชั้นมากขึ้น ซึ่งการที่จุดสีบริเวณเดียวกันมีความต่างระดับของชั้น ทำให้การคำนวณโดยใช้ค่าของเพื่อนบ้านบริเวณใกล้เคียงไม่มีประสิทธิภาพมากนัก และทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเซลล์ ฉะนั้นเมฆที่มีความแตกต่างของค่าสีมากหรือน้อยเกินไปโดยรวมทั้งภาพ อาจได้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีนัก ทั้งนี้เป็น

เพราะขั้นตอนในการแบ่งส่วนของภาพเมฆจะได้ตำแหน่งที่กระจุกกระจายอยู่ในหลายชั้น หรืออยู่ในชั้นเดียวกัน ซึ่งมีผลกระทบต่อการนำมาสร้างข้อมูลสามมิติ

5.1.8 วิเคราะห์ประสิทธิภาพและเปรียบเทียบผล

สำหรับวิธีการจำลองภาพสามมิติของเมฆในงานวิจัยฯ ซึ่งใช้รูปแบบของวิธีการทางเซลล์ลาร์อโตมาตาจะมีความยืดหยุ่นกับเมฆในหลายลักษณะ และไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลอื่นเพิ่มเติม นอกจากนี้ยังช่วยให้เมฆในชั้นต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นใหม่มีความแตกต่างกันไปโดยผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องกำหนดเอง และจะเป็นไปตามเงื่อนไขที่เป็นกำหนดขึ้นในครั้งแรก อีกทั้งไม่ต้องยุ่งยากในการจัดการข้อมูลหรือใช้สมการที่ซับซ้อนเพื่อสร้างข้อมูลของเมฆในสามมิติ รวมถึงมีต้นทุนไม่แพงและมีความรวดเร็วในการประมวลผล ซึ่งเมื่อเทียบกับงานวิจัยการสร้างภาพสามมิติของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียมทั้งหมด ถือว่าวิธีการในงานวิจัยฯ นี้มีประสิทธิภาพที่สูงและมีคุณภาพที่พอเพียงต่อการใช้ในการสร้างมโนภาพสามมิติของเมฆ

5.2 ผลการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆ

สำหรับการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆ จะนำข้อมูลสามมิติของภาพถ่ายดาวเทียมสองภาพที่สร้างขึ้นในกระบวนการจำลองภาพถ่ายดาวเทียมของเมฆมาหาภาพตรงกลาง เพื่อให้ภาพตั้งต้นสามมิติของสองภาพดังกล่าวมีความต่อเนื่องกัน และแสดงผลเรียงต่อกันเป็นภาพเคลื่อนไหวของเมฆในสามมิติที่มีความนุ่มนวลมากขึ้น

5.2.1 ผลการทดลองสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆ

สำหรับในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้ทดลองกับภาพในลักษณะต่าง ๆ ไม่เฉพาะภาพถ่ายดาวเทียมที่อยู่ในบริเวณเดียวกันที่ช่วงเวลาต่างกันเท่านั้น ซึ่งช่วยทำให้เห็นข้อดีและข้อเสียของวิธีการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆสามมิติในงานวิจัยฯ ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

5.2.1.1 ผลการทดลองสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆจากภาพที่สร้างขึ้นเอง

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบวิธีการในงานวิจัยฯ ด้วยตัวอย่างการเปลี่ยนเลข 1 ไปเป็นเลข 2 (รูปที่ 5.15) ซึ่งแสดงเฟรมของภาพเคลื่อนไหวดังกล่าวจำนวน 6 เฟรม โดยมีเฟรมที่สร้างขึ้นระหว่างกลางทั้งหมด 4 เฟรม แสดงดังลำดับภาพเคลื่อนไหวของรูปที่ 5.16 อีกทั้งแสดงผลภาพการเปลี่ยนพื้นที่ ๆ วาดขึ้นมาดังลำดับภาพเคลื่อนไหวของรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.15 ภาพต้นทาง (ซ้าย) และภาพปลายทาง (ขวา) ที่นำมาทดลองสร้างเฟรม



(ก) เฟรมที่ 1



(ข) เฟรมที่ 2



(ค) เฟรมที่ 3



(ง) เฟรมที่ 4



(จ) เฟรมที่ 5

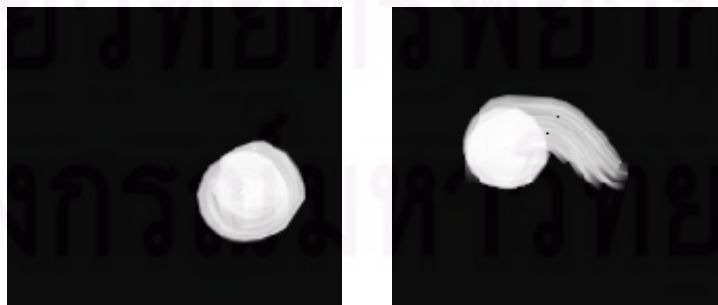


(ฉ) เฟรมที่ 6



(ช) ตัวอย่างภาพเคลื่อนไหวของเมฆ

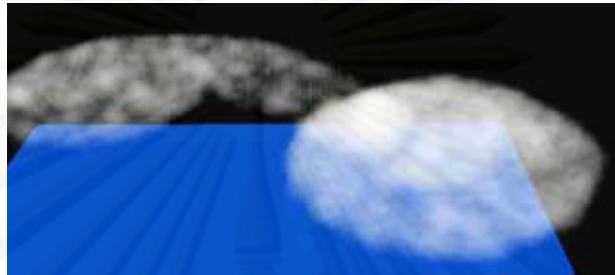
รูปที่ 5.16 ภาพเคลื่อนไหวในสามมิติของการเปลี่ยนจากเลข 1 ไปเป็นเลข 2 ด้วยวิธีของงานวิจัยฯ (ก) – (ฉ) และแสดงการเรียงเฟรมต่อเนื่องกันภายในบรรทัดเดียว (ช)



รูปที่ 5.17 ภาพที่นำมาทดสอบในกรณีที่พื้นที่เมฆส่วนใหญ่ของภาพต้นทาง (ซ้าย) และภาพปลายทาง (ขวา) ไม่ซ้อนทับกัน หรือเชื่อมต่อกันเพียงเล็กน้อย



(ก) เฟรมที่ 1



(ข) เฟรมที่ 2



(ค) เฟรมที่ 3



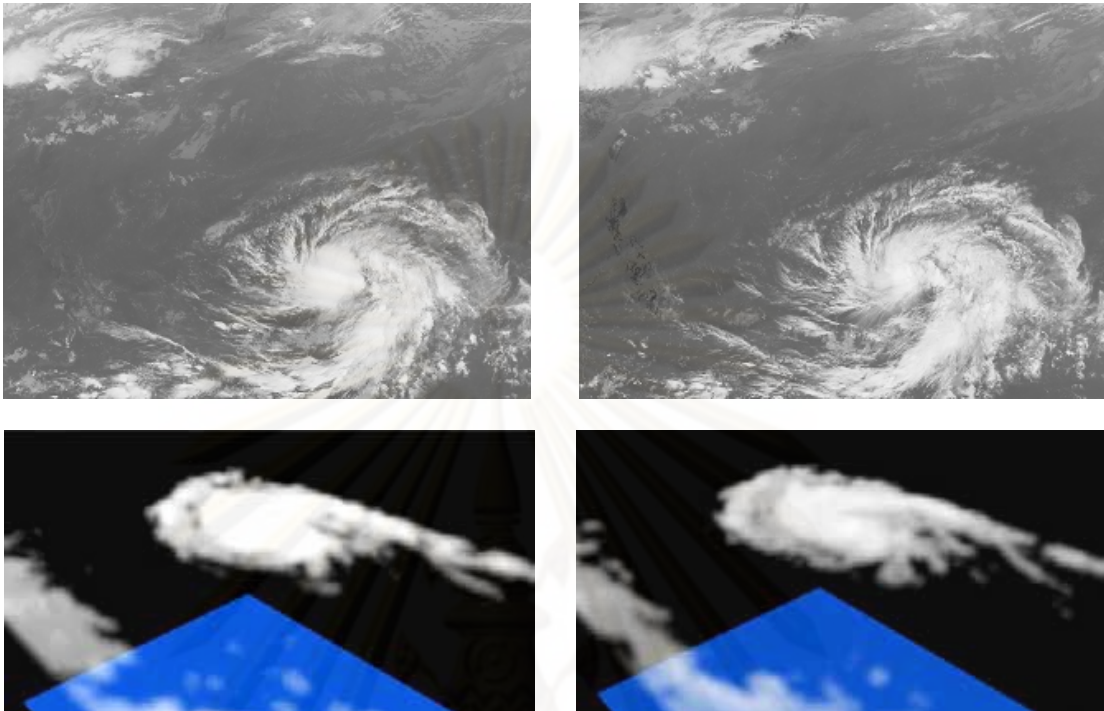
(ง) เฟรมที่ 4



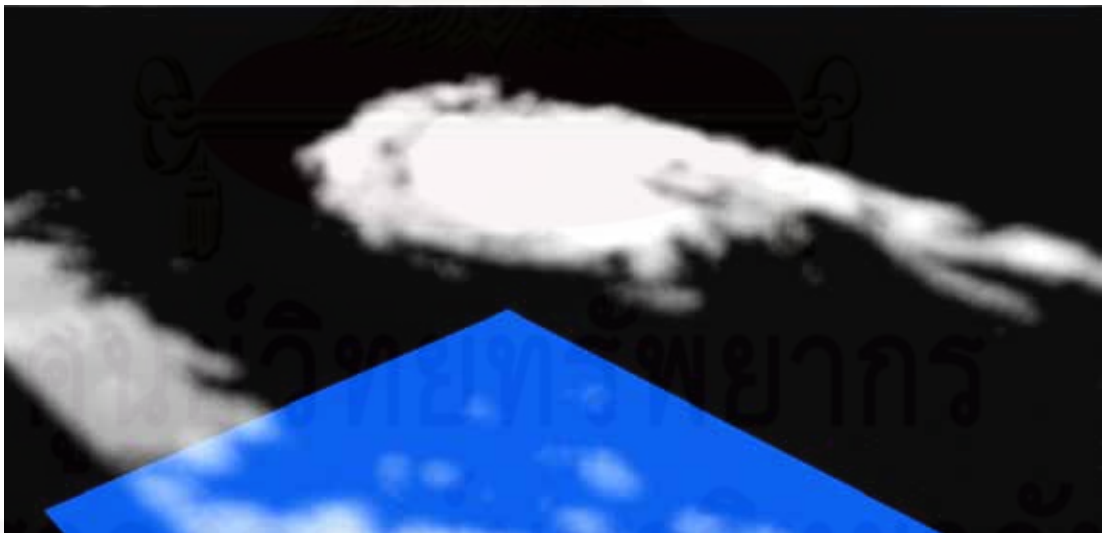
(จ) เฟรมที่ 5

รูปที่ 5.18 ภาพต่อเนื่องสามมิติที่สร้างจากภาพต้นทางและปลายทางของรูปที่ 5.17 ซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่ของทั้งสองภาพไม่เชื่อมต่อกัน

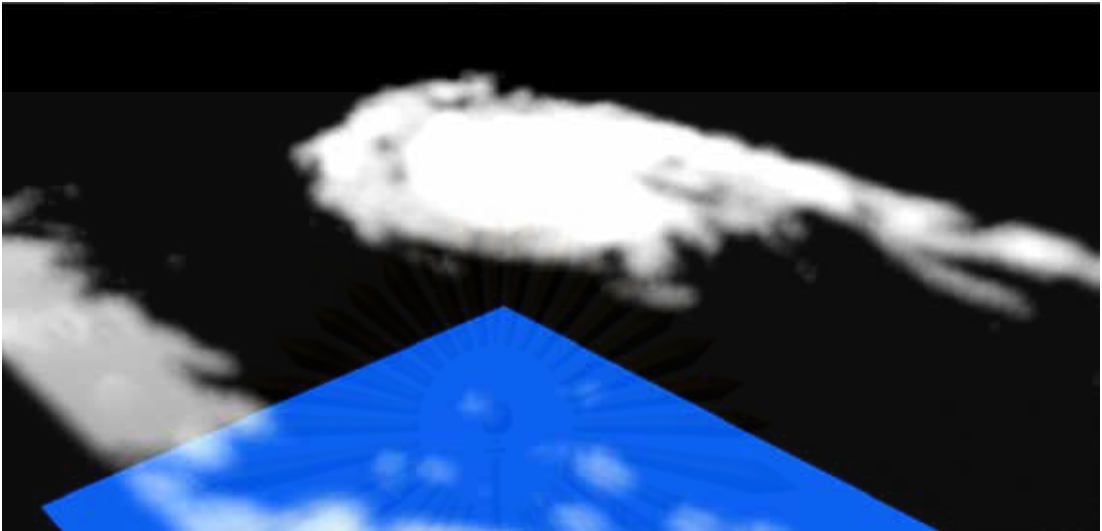
5.2.1.2 ผลการทดลองสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียม



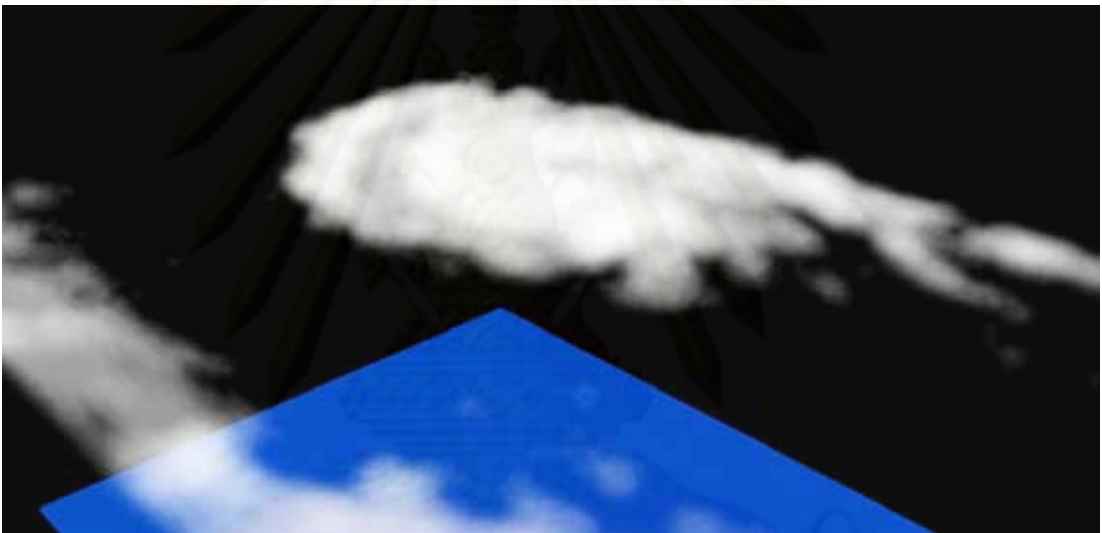
รูปที่ 5.19 ภาพถ่ายดาวเทียมต้นทาง (บนซ้าย), ภาพถ่ายดาวเทียมปลายทาง (บนขวา), ภาพสามมิติของภาพถ่ายดาวเทียมต้นทาง (ล่างซ้าย) และภาพสามมิติของภาพถ่ายดาวเทียมปลายทาง (ล่างขวา)



(ก) เฟรมที่ 1



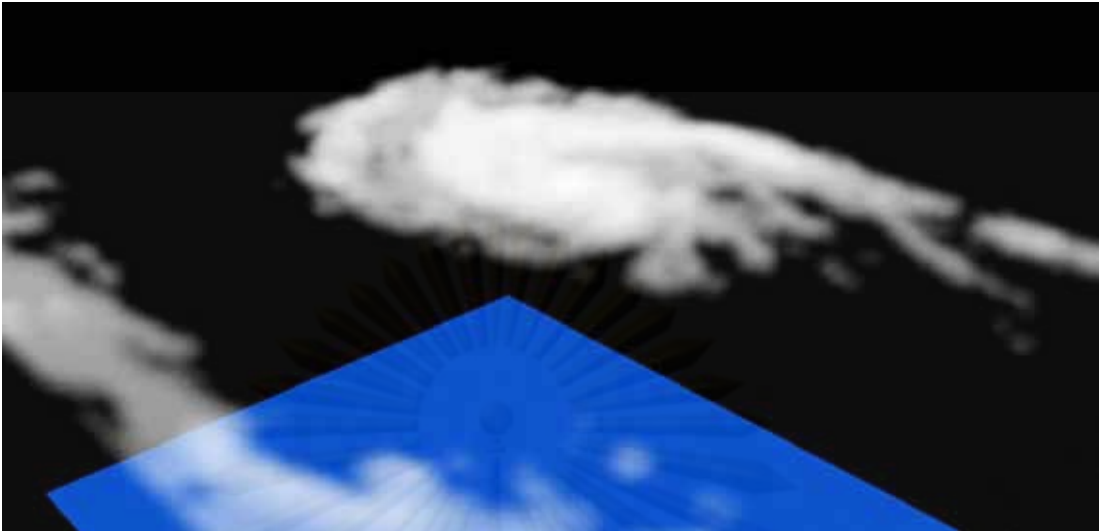
(ข) เฟรมที่ 2



(ค) เฟรมที่ 3



(ง) เฟรมที่ 4

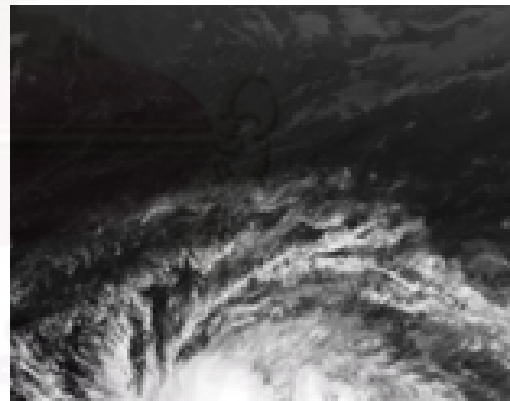
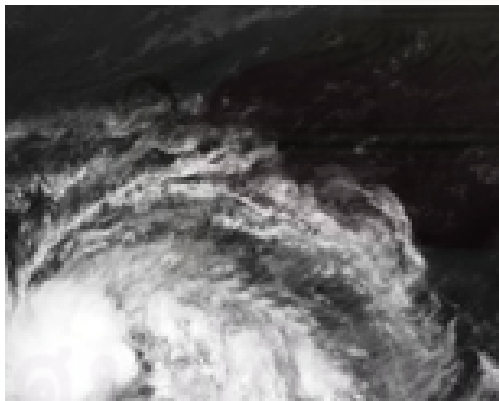


(จ) เฟรมที่ 5



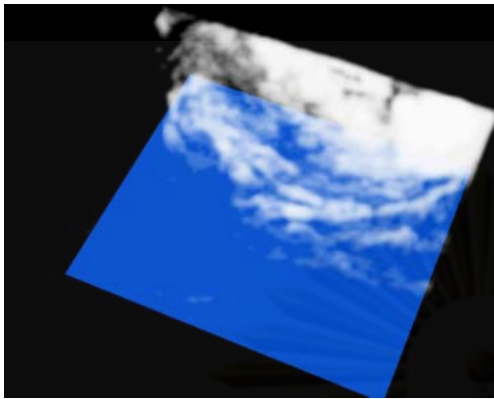
(ฉ) ตัวอย่างภาพเคลื่อนไหวของเมฆ

รูปที่ 5.20 ภาพเคลื่อนไหวสามมิติของวิธีในงานวิจัยฯ จากภาพถ่ายดาวเทียมต้นทางจนถึงภาพถ่ายดาวเทียมปลายทางในรูปที่ 5.19 จำนวน 5 เฟรม (ก) – (จ) และแสดงการเรียงเฟรมต่อเนื่องกันภายในบรรทัดเดียว (ฉ)

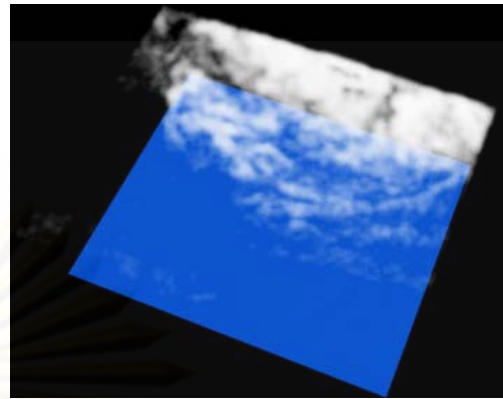


รูปที่ 5.21 ภาพถ่ายดาวเทียมต้นทาง (บนซ้าย), ภาพถ่ายดาวเทียมปลายทาง (บนขวา) โดยเลือกภาพถ่ายดาวเทียมในพื้นที่ ๆ ต่างต่างกัน

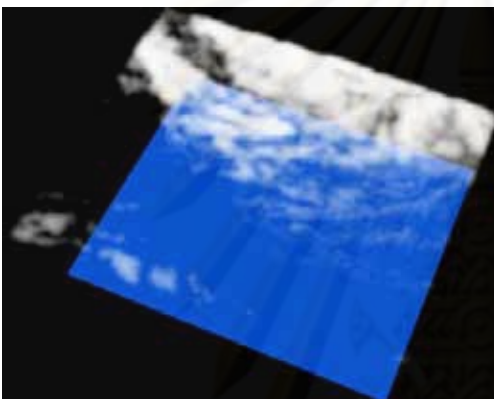
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



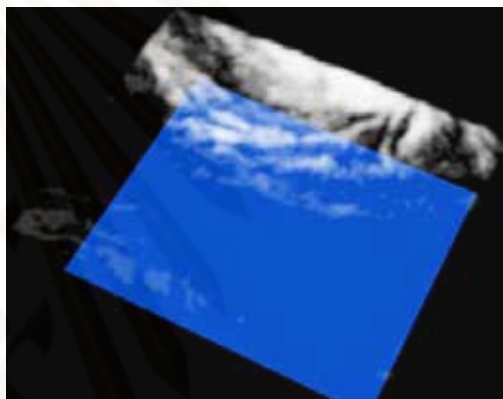
(ก) เฟรมที่ 1



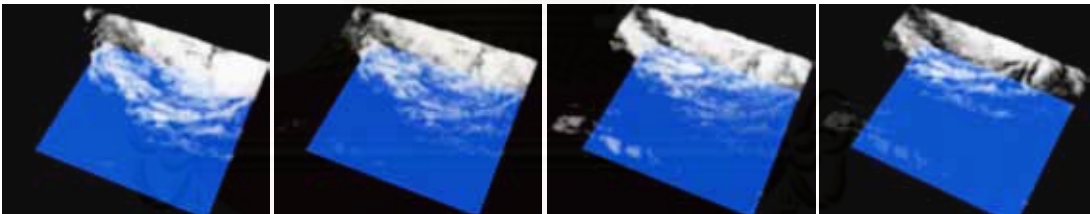
(ข) เฟรมที่ 2



(ค) เฟรมที่ 3



(ง) เฟรมที่ 4



(จ) ตัวอย่างภาพเคลื่อนไหวของเมฆ

รูปที่ 5.22 ภาพเคลื่อนไหวสามมิติของวิธีในงานวิจัยฯ จากภาพถ่ายดาวเทียมในรูปที่ 5.21 จำนวน 4 เฟรม (ก) – (ง) และแสดงการเรียงเฟรมต่อเนื่องกันภายในบรรทัดเดียว (จ)

5.2.2 ความเร็วในการประมวลผล

การจับเวลาเพื่อทดสอบความเร็วในสร้างเฟรมภาพเคลื่อนไหวของเมฆในสามมิติด้วยวิธีในงานวิจัยฯ ได้ทดสอบกับคอมพิวเตอร์ขนาดความเร็วเช่นเดียวกับการจำลองภาพสามมิติของเมฆคือที่ ความเร็วซีพียู Core2 Duo 2.26 GHz หน่วยความจำแรม 3 GB บนระบบปฏิบัติการ Windows 7 ซึ่งแสดงความเร็วโดยประมาณในการสร้างเฟรมแต่ละเฟรมดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ความเร็วในการประมวลผล การสร้างเฟรมของภาพเคลื่อนไหวเมฆในสามมิติจากภาพต้นทางไปยังภาพปลายทาง ที่ได้จากการทดลอง

ภาพต้นทาง/ ภาพปลายทาง	ขนาดภาพ (กว้าง x ยาว x สูง)	จำนวนอนุภาคเมฆ ต้นทาง/ปลายทาง	เวลาเฉลี่ยที่ใช้ ประมวลผลต่อ 1 เฟรม
เลข 1/เลข 2	149x121x4 (72,116)	1,637/2,840	2.8 วินาที
เลข 1/เลข 2	149x121x6 (108,174)	2,525/4,322	4.8 วินาที
ภาพเมฆในภาพถ่าย ดาวเทียม	154x122x4 (75,152)	18,525/10,944	3 วินาที
ภาพเมฆในภาพถ่าย ดาวเทียม	154x122x6 (112,728)	30,932/19,807	4.4 วินาที

จากผลการทดลองพบว่าความเร็วในการประมวลผลขึ้นอยู่กับขนาดกว้าง ยาว และสูงของภาพเป็นสำคัญ โดยไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนอนุภาคเมฆที่สร้างขึ้น เนื่องจากวิธีการในงานวิจัยฯ นั้นจะคำนวณและเปรียบเทียบทุกบริเวณของภาพต้นทางและภาพปลายทาง ซึ่งแสดงฟังก์ชันสัญกรณ์โอใหญ่ (Big O notation) ได้ดังสมการที่ 5.1 แต่ละเทอมของสมการแทนขั้นตอนของการกำหนดทิศทางเคลื่อนที่เริ่มต้น, การเคลื่อนตัวของเวกเตอร์แลตทิซ, การตรวจสอบการชนกัน, การคำนวณค่าสีของเมฆจากบัพในแลตทิซ, การคำนวณค่าสีของเมฆจากบัพในแลตทิซ, และการพิจารณาการสลายตัวและก่อตัวใหม่ของเมฆตามลำดับ และให้ n ในสมการแทนขนาดภาพหรือจำนวนจุดภาพสามมิติ (กว้าง x ยาว x สูง), ให้ b แทนจำนวนบัพของเพื่อนบ้านที่นำมาพิจารณาร่วม (เช่น 6 หรือ 14 เป็นต้น) และ c เป็นต้นทุนที่ใช้ในการคำนวณค่าบิตของขั้นตอนการเคลื่อนตัวของเวกเตอร์แลตทิซ และขั้นตอนการตรวจสอบการชน ในส่วนของเทอมแรกซึ่งแสดงเป็น $o(b!n)$ นั้นเนื่องจากการนำเพื่อนบ้านแต่ละตัวมาเปรียบเทียบกับเพื่อกำหนดทิศทางเริ่มต้น และในเทอมสุดท้ายแสดงเป็น $o(2n)$ เนื่องจากการพิจารณาการก่อตัวและสลายตัวของเมฆในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งเมื่อนำทุกกรณีมารวมกัน ขนาดการคำนวณจะขึ้นอยู่กับขนาดกริดสามมิติที่กำหนดคือเท่ากับ $O(n)$

$$o(b!n) + o(n(b+c)) + o(n(b+c)) + o(bn) + o(2n) = O(n) \quad 5.1$$

5.2.3 ข้อจำกัดของวิธีการ

เนื่องจากภาพถ่ายดาวเทียมที่จะนำมาใช้กับวิธีการในงานวิจัยฯ จะต้องมีขนาดเท่ากันทั้งภาพต้นทางและภาพปลายทาง รวมถึงต้องกำหนดค่าชั้นความสูง (depth) ให้ขนาดเท่ากันในขั้นตอนการสร้างภาพสามมิติ ฉะนั้นจึงไม่สามารถนำภาพถ่ายขนาดต่างกันมาใช้กับ

งานวิจัยได้ อย่างไรก็ตามถ้าลำดับภาพต่อเนื่องของภาพถ่ายดาวเทียมส่วนใหญ่จะมีขนาดกว้างและยาวเท่ากัน แต่ในส่วนที่เป็นชั้นคือความสูงของเมฆจะต้องกำหนดให้เท่ากัน ทั้งนี้เพราะการกำหนดชั้นความสูงของเมฆด้วยค่าสีอาจทำให้เมฆของภาพต้นทางและภาพปลายทางมีความสูงที่ไม่สอดคล้องกัน เนื่องด้วยสีของเมฆในภาพถ่ายดาวเทียมจะมีผลมาจากความสัมพันธ์ (relative) ของความสูง อุณหภูมิ ความชื้น หรือแสงที่มาจากกระทบ จึงไม่อาจแทนค่าที่แท้จริงของข้อมูลได้ และอาจส่งผลให้เกิดความผิดพลาดสำหรับขั้นตอนการแบ่งชั้น เมื่อต้องเปรียบเทียบกันระหว่างภาพสองภาพ

สำหรับการกำหนดเงื่อนไขเพื่อให้เมฆเคลื่อนที่ถือเป็นขั้นตอนที่ละเอียดอ่อน ตัวอย่างการทดลองหัวข้อที่ 5.2.1.1 ภาพตั้งต้นที่ถูกสร้างขึ้นโดยไม่มีลักษณะของเมฆ และมีภาพต้นทางกับภาพปลายทางที่ไม่เกี่ยวเนื่องกัน อาจไม่สามารถแสดงคุณลักษณะการเคลื่อนที่ด้วยวิธีแลตทิซแก๊สอโตมาตาได้มากนัก ทั้งนี้เพราะทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ถูกกำหนดขึ้นในขั้นตอนแรกของแต่ละตำแหน่งอาจไม่ใช่ทิศทางที่เหมาะสมของการเคลื่อนที่ นอกจากนี้ในขั้นตอนที่ใช้ก่อดาวของเมฆอาจทำให้พื้นที่บางส่วนของเมฆในเฟรมใหม่ที่สร้างขึ้นมีความหนาแน่นของปริมาณเมฆมากกว่าภาพปลายทาง ซึ่งจะต้องปรับปรุงเงื่อนไขการก่อดาวของเมฆเพิ่มเติม

5.2.4 วิเคราะห์ประสิทธิภาพและเปรียบเทียบผล

เฟรมใหม่ที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการในงานวิจัยฯ แสดงรูปลักษณะที่มีความคล้ายคลึงกับเมฆ อีกทั้งมีความสอดคล้องกับภาพต้นทางและภาพปลายทางเป็นอย่างดี โดยผู้ใช้ไม่ต้องยุ่งยากในการกำหนดทิศทางด้วยตนเอง รวมทั้งไม่จำเป็นต้องมีข้อมูลอื่น ๆ ของเมฆที่ทำให้ต้องใช้ต้นทุนทางทรัพยากรสูงขึ้น จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมในการแสดงผลโมโนภาพที่ต่อเนื่องของเมฆจากข้อมูลที่มีอยู่อย่างจำกัด และสามารถแสดงความต่อเนื่องของภาพเมฆได้ตามวัตถุประสงค์ ซึ่งเมื่อเทียบกับวิธีการในงานวิจัยสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียมโดยทั่วไปแล้วสามารถช่วยลดต้นทุน, ไม่จำเป็นต้องใช้เอ็นิเมเตอร์, มีความรวดเร็วในการประมวลผล และสามารถเข้ากับโครงสร้างเมฆที่ซับซ้อนหรือมีกลุ่มของเมฆที่กระจัดกระจายได้

อย่างไรก็ตามขั้นตอนที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ต้องพิจารณา คือการแบ่งพื้นที่ของกริด (ดูหัวข้อ 4.2.2) เพื่อใช้กำหนดทิศทางเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งหากขนาดของกริดที่แบ่งไม่เหมาะสมกับพื้นที่ของเมฆในภาพ หรือลำดับการกำหนดพื้นที่เพื่อหาทิศทางเริ่มต้นไม่สอดคล้องกัน ก็จะทำให้การอ้างอิงทิศทางผิดพลาดไปจากแนวโน้มที่ถูกต้องได้ จึงเป็นข้อที่ต้องระวังในการพัฒนากระบวนการของวิธีการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆในงานวิจัยฯ

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฯ นี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองสามมิติของเมฆโดยอัตโนมัติ และเสนอวิธีการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆในสามมิติจากภาพถ่ายดาวเทียมเพียงสองภาพ โดยนำความสัมพันธ์ระหว่างเพื่อนบ้านของแต่ละเซลล์หรือบัพ มาเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะค่าสีของเมฆในสามมิติแต่ละชั้นเวลา ซึ่งในส่วนขั้นตอนการสร้างภาพเคลื่อนไหวได้เสนอวิธีการปรับกริดเพื่อใช้กับงานวิจัยฯ และวิธีการสร้างเวกเตอร์การเคลื่อนที่เริ่มต้นให้กับระบบ รวมถึงการพัฒนาขั้นตอนที่ใช้ในอัลกอริทึมสถานะของเวกเตอร์สำหรับชนิดข้อมูลที่เป็นเมฆ ซึ่งวิธีที่งานวิจัยฯ มีผลสำเร็จโดยสามารถสรุปได้จากการทดลองโดยแบ่งเป็นสองส่วนดังนี้

1. ส่วนการสร้างแบบจำลองเมฆในสามมิติ

จากคุณภาพของเมฆสามมิติและความเร็วในการสร้างภาพสามมิติที่ได้จากการทดลอง นับว่าน่าพึงพอใจและเหมาะสมต่อการนำมาใช้สร้างภาพสามมิติของเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียมในลักษณะเวลาตามจริง (real time) ซึ่งเมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาถือว่าคุณภาพและรายละเอียดของเมฆมีความสวยงามและสมจริงในระดับที่เทียบเท่ากันหรือดีกว่า อาทิเช่น การประมวลผลภาพสามมิติของเมฆให้ผลที่ใกล้เคียงกันกับวิธีวิธีเมเตบอล แต่ใช้เวลาคำนวณที่น้อยกว่าเป็นต้น นอกจากนี้วิธีการในงานวิจัยฯ ยังสามารถสร้างส่วนของท้องเมฆที่แตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้า คือท้องเมฆของแต่ละตำแหน่งจะไม่อยู่ในระดับอ้างอิงเดียวกัน อีกทั้งเมฆด้านบนและด้านล่างที่สร้างด้วยวิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องมีลักษณะสมมาตรกัน อย่างไรก็ตามการแบ่งชั้นเมฆจำนวนมากเกินไปอาจจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ผิดปกติกจากลักษณะของเมฆ ทั้งนี้เพราะลักษณะของกฎที่ต้องคำนวณเกี่ยวข้องกับเพื่อนบ้าน ซึ่งมีข้อจำกัดเมื่อเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดอยู่ห่างจากกันมาก ซึ่งส่งผลให้ส่วนของท้องเมฆที่สร้างได้มีความไม่สมบูรณ์มากนัก

2. ส่วนการสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆ

การนำกฎของวิธีแลตทิซแก๊สอโตมาตามาใช้สร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆ แท้จริงแล้วเพื่อทำให้การเคลื่อนที่ของเมฆแต่ละจุดมีทิศทางหรือแนวโน้มที่ไม่จำเป็นต้องเหมือนกัน แต่อยู่ภายใต้หลักการหรือกฎการเคลื่อนที่ ๆ สอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามขั้นตอนการเคลื่อนที่, การชน, และการเปลี่ยนทิศทางเมื่อชนของวิธีแลตทิซแก๊สอโตมาตาอาจจะยังไม่รองรับการก่อตัวและสลายตัวของเมฆที่เกิดขึ้นตลอดเวลา ทั้งนี้เพราะเมฆสามารถเปลี่ยนสถานะระหว่างที่เป็นไอน้ำและเป็นเมฆด้วยการควบแน่นและระเหิด จึงทำให้ต้องหาวิธีการที่ครอบคลุมกับกรณีดังกล่าว ซึ่งงานวิจัยฯ ได้เสนอวิธีการที่สามารถใช้ในการก่อตัวหรือสลายตัวของเมฆได้ แต่อย่างไรก็ดีวิธีทั้งสองส่วน คือส่วนที่ทำให้เมฆเคลื่อนที่และส่วนที่นำมาเปลี่ยนสถานะของเมฆยังจำเป็นต้องปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพและมีความสอดคล้องกัน เพราะในบางกรณีเมื่อการเคลื่อนที่ของเมฆ เกิดขึ้นช้ากว่าการที่เมฆก่อตัวหรือสลายตัวไป จะทำให้ภาพเมฆที่อยู่ต้นทาง

กลายเป็นภาพเมฆปลายทางโดยเกิดการเคลื่อนตัวเพียงเล็กน้อย ซึ่งก็ด้วยการเคลื่อนที่ด้วยวิธี แลตทิซแก๊สอโตมาตาเคลื่อนเมฆเพียงครั้งละบัพ แต่การเปลี่ยนสถานะของเมฆ (ก่อตัวและสลายตัว) จะเปลี่ยนแปลงทั้งภาพ จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จำเป็นต้องปรับปรุงเพื่อให้การสร้างภาพเคลื่อนไหวของเมฆมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นกว่าเดิม

6.1 ข้อเสนอนี้

การจำลองภาพสามมิติของเมฆในงานวิจัย ผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานจากความเข้าใจบางส่วนที่มีต่อเมฆภายใต้เงื่อนไขของภาพถ่ายดาวเทียม ซึ่งถ้าหากเราสามารถแบ่งส่วนของเมฆให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น ก็จะทำให้การสร้างชั้นเมฆสามมิติมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้นด้วย สำหรับภาพถ่ายที่นำมาใช้ทดลองกับงานวิจัย เป็นภาพถ่ายชนิด JPG, JPEG, GIF, BMP หรือ PNG ซึ่งมีบ่อยครั้งที่ไฟล์ภาพถ่ายดาวเทียมจะถูกเก็บไว้ในรูปแบบอื่น อาทิเช่น .DDS ที่ประกอบด้วยพิกัดของตำแหน่งภาพถ่ายดาวเทียมเมื่อเทียบกับละติจูดและลองจิจูดของพื้นโลก กระทั่งอยู่ในรูปแบบของอนุกรม และถ้าหากเราสามารถนำข้อมูลลักษณะดังกล่าวเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการ ก็น่าจะทำให้การแสดงภาพสามมิติของเมฆมีความแม่นยำของข้อมูลมากขึ้น

ในขั้นตอนกำหนดทิศทางของเมฆแต่ละตำแหน่งของการสร้างภาพเคลื่อนไหวเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้เมฆแต่ละตำแหน่งเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่เหมาะสม ซึ่งในขั้นตอนนี้สามารถนำภาพถ่ายดาวเทียมที่ต่อเนื่องกันมากกว่า 2 ภาพ มาพิจารณาหาทิศทางได้ แต่อาจทำให้ผู้วิจัยต้องกำหนดรายละเอียดของกฎที่ซับซ้อนมากขึ้น และนอกจากนั้นควรต้องทำการปรับกฎบางส่วนที่ใช้ในการเคลื่อนอนุภาคเมฆด้วยวิธีแลตทิซแก๊สอโตมาตากับกฎที่สร้างขึ้นสำหรับการก่อกำเนิดและสลายเมฆโดยให้มีความสอดคล้องกัน เพื่อให้เมฆขณะเคลื่อนที่กับขณะเปลี่ยนแปลงสถานะแสดงคุณลักษณะที่ส่งเสริมกัน และทำให้ภาพเมฆดูเป็นธรรมชาติมากขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีการแลตทิซแก๊สอโตมาตาที่นำมาใช้ในขั้นตอนการทดลองยังเป็นแบบจำลอง FHP-I เท่านั้น ซึ่งสามารถพัฒนาและปรับปรุงเพื่อนำกฎและวิธีการของแลตทิซแก๊สแบบอื่น ๆ รวมถึงแลตทิซโบลท์แมนมาใช้ทดแทนได้ จึงน่าจะช่วยให้การเคลื่อนไหวของเมฆในสามมิติมีความเป็นธรรมชาติมากขึ้น

งานวิจัยการสร้างภาพเคลื่อนไหวเมฆในสามมิติโดยใช้อโตมาตาแบบแก๊สแลตทิซนี้เป็นเพียงการนำเสนอและพัฒนารูปแบบของการแสดงมโนภาพเคลื่อนไหวของเมฆในระบบสามมิติ โดยไม่ต้องใช้สมการที่ยุ่งยาก ซึ่งผลลัพธ์จะสำเร็จดังที่คาดหวังหรือไม่ ขึ้นอยู่กับการตั้งสมมติฐานคุณสมบัติทางกายภาพของเมฆเพื่อนำมาใช้สร้างเงื่อนไขให้สอดคล้องกับวัตถุที่มีอยู่ในรูปแบบของกฎ จากนั้นเมื่อใส่วัตถุเข้าไปและปล่อยให้กฎทำงาน ก็จะเกิดเป็นผลลัพธ์ดังที่ได้ตั้งสมมติฐาน ซึ่งโครงสร้างที่ดูเหมือนซับซ้อนในบั้นปลายนั้น แท้จริงแล้วถือกำเนิดขึ้นจากสิ่งที่เรียบง่ายยิ่งกว่า นั่นคือตัวตนของมันและสิ่งแวดล้อมรอบตัวมันเท่านั้นเอง ซึ่งนี่คือรากฐานหรือปรัชญาพื้นฐานของเซลล์ูลาร์อโตมาตา.

รายการอ้างอิง

- [1] Dobashi, Y., Nishita, T., Yamashita, H., and Okita, T. Using metaballs to modeling and animate clouds from satellite images. The Visual Computer 15 (1999): 471-482.
- [2] National Weather Service. JetStream - Online School for Weather [Online]. Available from: <http://www.srh.noaa.gov/jetstream/remote/goes.htm> [2010, January 10]
- [3] Neumann, J.V. Theory of Self-Reproducing Automata. Illinois, USA: University of Illinois Press Champaign, 1966.
- [4] Beyer, W.A., Sellers, P.H., and Waterman, M.S. Stanislaw M. Ulam's Contributions to Theoretical Theory. Letters in Mathematical Physics 10 (1985): 231-242.
- [5] Codd, E.F. Cellular Automata. New York: Academic Press, 1968.
- [6] Gardner, M. Mathematical Games - The fantastic combinations of John H. Conway's new solitaire game Life. Scientific American 223 (October 1970): 120-123.
- [7] Wolfram, S. A New Kind of Science. Wolfram Media, 2002.
- [8] Giraldi, G.A., Xavier, A.V., Jr, A.L.A., and Rodrigues, P.S. Lattice Gas Cellular Automata for Computational Fluid Animation. In XVIII Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, Brasil, 2005.
- [9] Raabe, D. Overview of the lattice Boltzmann method for nano- and microscale fluid dynamics in materials science and engineering. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering 12 (November 2004)
- [10] Wolf-Gladrow, D.A. Lattice-Gas Cellular Automata and Lattice Boltzmann Models - An Introduction. Springer, 2005.
- [11] Hardy, J., Pazzis, O.d., and Pomeau, Y. Molecular dynamics of a classical lattice gas: Transport properties and time correlation functions. Physics Review A 13 (May 1976): 1949-1961.

- [12] Hardy, J., Pazzis, O.d., and Pomeau, Y. Thermodynamics and hydrodynamics for a modeled fluid. Journal of Mathematical Physics 13 (1972): 1042–1051.
- [13] Hardy, J., Pazzis, O.d., and Pomeau, Y. Time evolution of a two-dimensional model system. i. invariant states and time correlation functions. Journal of Mathematical Physics 14 (1973): 1746–1759.
- [14] Frisch, U., Hasslacher, B., and Pomeau, Y. Lattice-gas automata for the navier-stokes equations. Physical Review Letters 56 (1986): 1505–1508.
- [15] Nagel, K., and Raschke, E. Self-organizing criticality in cloud formation? Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 182 (April 1992): 519-531.
- [16] Semwal, S., and Chandrashekhar, K. Cellular Automata for 3D Morphing of Volume Data. In Skala, V, International Conferences in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision. 2005, Czech Republic: Journal of WSCG, 2005.
- [17] Perlin, K. Making Noise: based on a talk presented at GDC HardCore gamers workshop on Dec 9, 1999. San Francisco, 1999. (Unpublished Manuscript)
- [18] Harris, M.J. Real-Time Cloud Simulation and Rendering. Doctoral dissertation, Department of Computer Science University of North Carolina, 2003.
- [19] Miyazaki, R., Yoshida, S., Nishita, T., and Dobashi, Y. A Method for Modeling Clouds Based on Atmospheric Fluid Dynamics. In Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, pp.363-372. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2001.
- [20] Wang, N. Realistic and Fast Cloud Rendering. Journal of Graphics Tools 9 (November 2004): 21-40.
- [21] Nishita, T., Dobashi, Y., and Nakamae, E. Display of clouds taking into account multiple anisotropic scattering and sky light. In Special Interest Group on Graphics and Interactive Techniques, pp.379 - 386. New York, USA: ACM Press, 1996.
- [22] Lee, C., Kesselman, C., and Schwab, S. Near-real-time satellite image processing: Metacomputing in CC++. In IEEE Computer Graphics and Applications, pp.79-84. IEEE Computer Society, 1996.

- [23] Dobashi, Y., Nishita, T., and Okita, T. Animation of Clouds Using Cellular Automaton. In IASTED International Conference on Computer Graphics and Imaging (CGIM'99), pp.251-256. ACTA Press, 1999.
- [24] Dobashi, Y., Kaneda, K., Yamashita, H., Okita, T., and Nishita, T. A Simple, Efficient Method for Realistic Animation of Clouds. In Special Interest Group on Graphics and Interactive Techniques: ACM Press, 2000.
- [25] Chuai-Aree, S., Jager, W., Bock, H.G., Kromker, S., Kanbua, W., and Siripant, S. 3D Cloud and Storm Reconstruction from Satellite Image. In High Performance Scientific Computing, Hanoi, Vietnam, 2006.
- [26] Kochi University. The satellite images in Asia [Online]. 2008. Available from: <http://weather.is.kochi-u.ac.jp/SE/00Latest.jpg> [2008, January 28]
- [27] Alvarez, L., Castaño, C.A., García, M., Krissian, K., Mazorra, L., Salgado, A., et al. 3D Atmospheric Cloud Structures: Processing and Visualization. In Computer Vision and Pattern Recognition, Canaria, Spain: AMI group, 2006.
- [28] Xiao-fang, X., Yong-jun, Q., and Tao, S. The Application of The Technology of 3D Satellite Cloud Imaging in Virtual Reality Simulation. Data Science Journal (Supplement) 6 (May 2007): S270-S277.
- [29] SlimDX Group Ltd. SlimDX [Online]. 2009. Available from: <http://slimdx.org/> [2009, December 20]
- [30] Torus Knot Software. Ogre [Online]. 2000. Available from: <http://www.ogre3d.org> [2009, December]

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



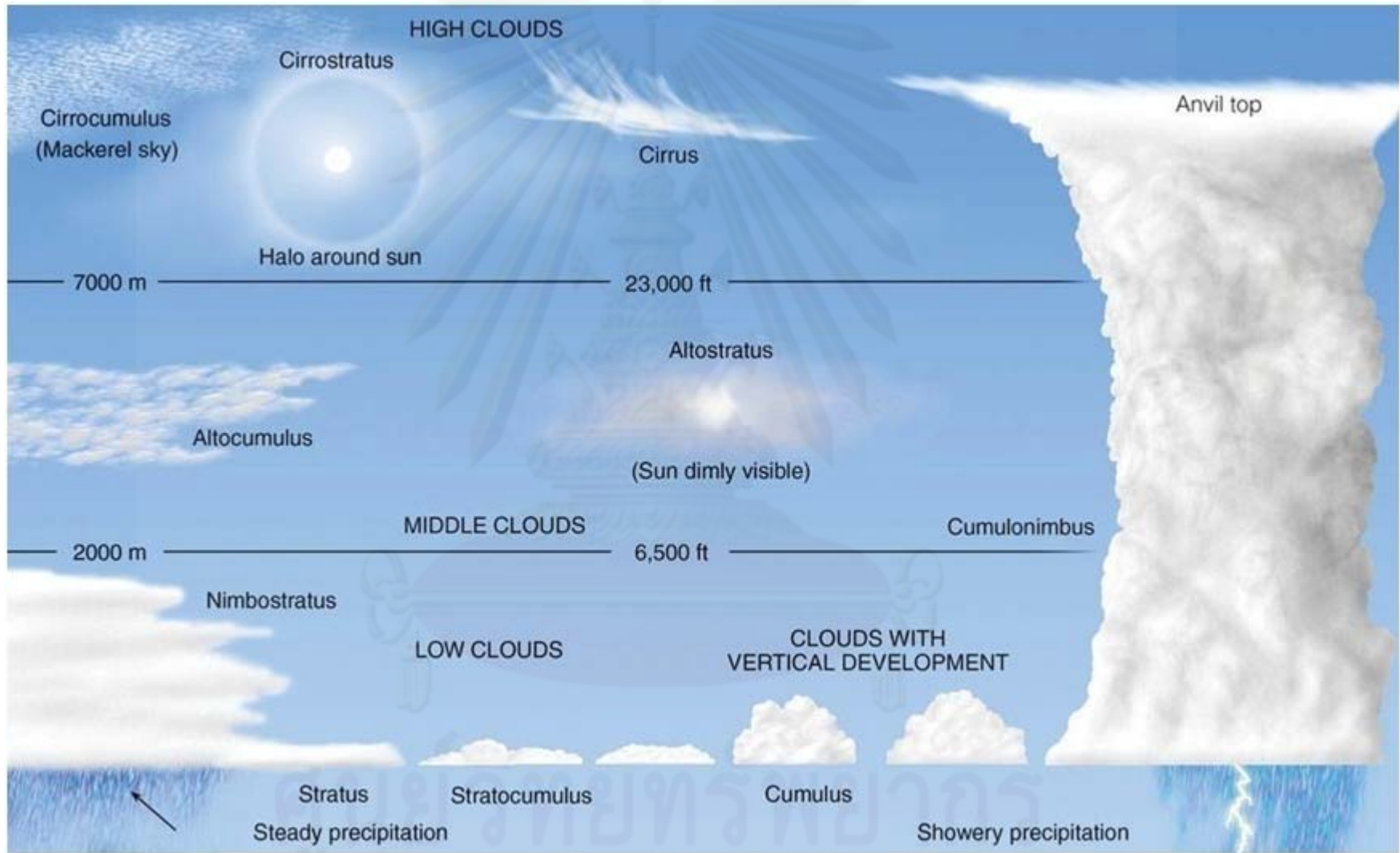
ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



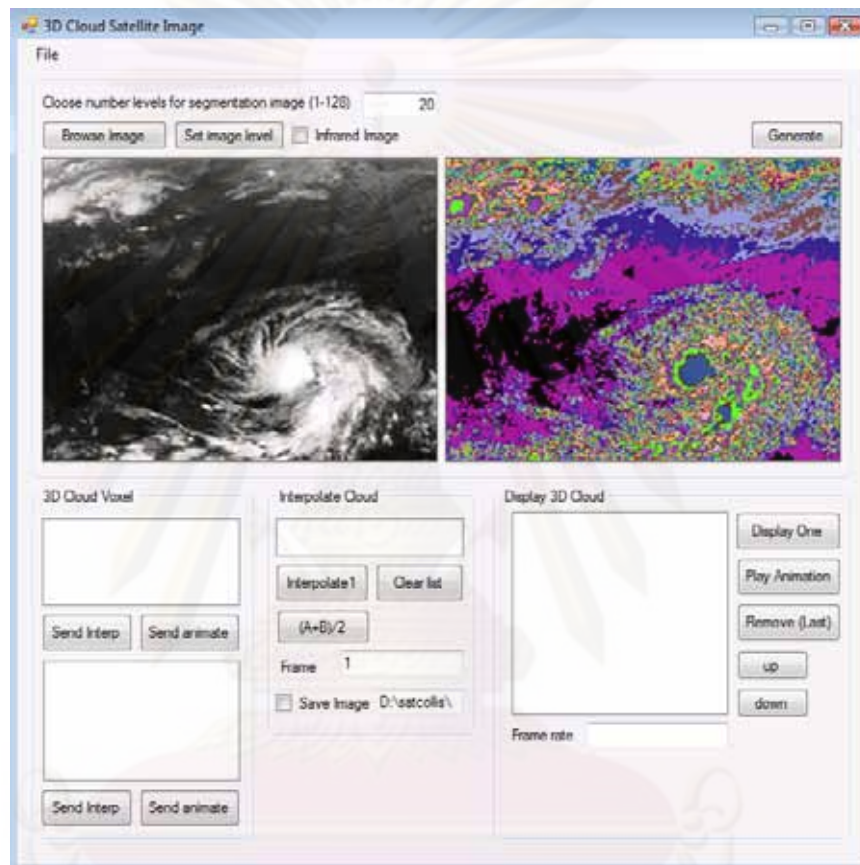
© 2007 Thomson Higher Education



ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการทดลองวิธีการของงานวิจัยการจำลองภาพเคลื่อนไหวเมฆในสามมิติโดยใช้วิธีอโตมาตาแบบแก๊ซแลตทิซ ผู้วิจัยได้พัฒนาโปรแกรมสำหรับจัดการตัวแปรและแสดงผลภาพสามมิติของเมฆ โดยผู้ใช้โปรแกรมจะต้องนำเข้าภาพถ่ายดาวเทียมสองมิติซึ่งเป็นภาพชนิด JPG, JPEG, GIF, BMP หรือ PNG เพื่อนำไปดำเนินการสร้างเป็นภาพสามมิติตามขั้นตอนที่จะแสดงต่อไปนี้



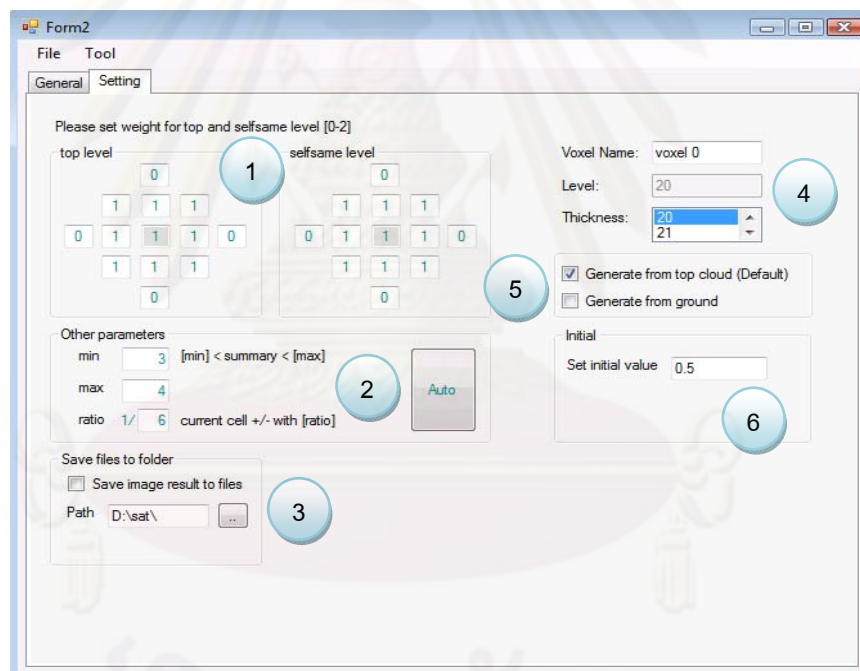
1. อินพุตภาพถ่ายดาวเทียมเข้าสู่โปรแกรมโดยกดปุ่ม **Browse Image** แล้วเลือกภาพถ่ายดาวเทียมประเภทสามารถเห็นได้ (visible satellite image) หรือประเภทอินฟราเรด (infrared satellite image) ที่ต้องการ

2. หากภาพถ่ายดาวเทียมที่นำเข้ามาเป็นภาพประเภทอินฟราเรดให้ทำเครื่องหมายในกล่อง **Infrared Image** แต่ถ้าหากเป็นภาพถ่ายดาวเทียมประเภทสามารถเห็นได้จะสามารถนำเข้าภาพได้โดยไม่ต้องทำเครื่องหมาย เมื่อนำเข้าภาพถ่ายดาวเทียมแล้ว ภาพดังกล่าวจะถูกแสดงในกล่องภาพซึ่งอยู่ด้านซ้ายของโปรแกรม

3. ผู้ใช้สามารถพิมพ์จำนวนชั้นของเมฆที่ต้องการด้านหลังข้อความ **Choose number levels for segmentation image** โดยตัวอย่างให้มีค่าเท่ากับ 20 เพื่อเลือกระดับชั้นของเมฆทั้งหมดที่ใช้ในการสร้างภาพสามมิติ

4. กดปุ่ม **Set Image level** เพื่อแบ่งกลุ่มสีของเมฆในภาพถ่ายดาวเทียมที่รับเข้ามาออกเป็นส่วนย่อยตามค่าที่ผู้ใช้กำหนด ซึ่งผลการแบ่งกลุ่มจะถูกแสดงในกล่องภาพด้านขวามือ

5. สามารถกดปุ่ม **Generate** เพื่อสร้างเมตริกซ์สีของอนุภาคเมฆสำหรับการจำลองภาพสามมิติของเมฆได้ ซึ่งโปรแกรมจะใช้ค่าตัวแปรที่ผู้วิจัยกำหนดในการสร้างภาพจำลอง หรือสามารถเลือกปรับเปลี่ยนค่าของตัวแปรได้โดยกดบริเวณภาพซึ่งแบ่งส่วนแล้ว (ภาพในกล่องภาพด้านขวาของโปรแกรม) โดยหน้าต่างสำหรับปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ จะปรากฏขึ้นมา แสดงดังภาพด้านล่าง



6. ผู้ใช้สามารถเลือกปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรได้ตามต้องการ อาทิ

6.1) ค่าน้ำหนัก (weight) ของเซลล์เพื่อนบ้านที่ตำแหน่งต่าง ๆ (neighboring cells)

6.2) ค่าอนุภาคต่ำสุดและสูงสุดของปริมาณรวมอนุภาค รวมถึงค่าสัดส่วนเพิ่มลดสำหรับอนุภาคที่เกิดขึ้นใหม่ตามสมการที่ 4.2

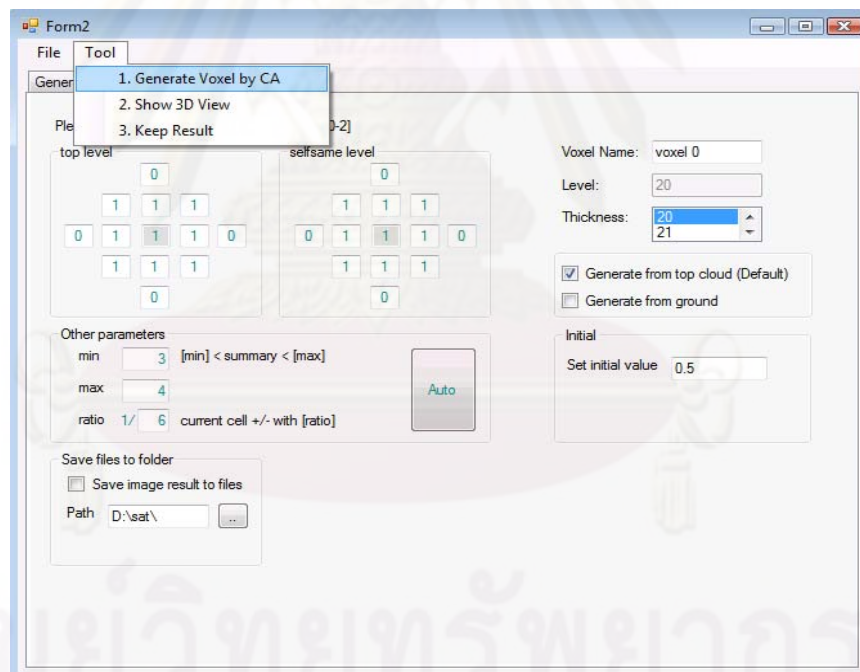
6.3) การเลือกบันทึกหรือไม่บันทึกภาพเลเยอร์ (layer images) ของเมฆแต่ละชั้นที่ถูกสร้างขึ้นลงในไดเรกทอรี (directory) ที่กำหนดไว้

6.4) ชื่อเรียกของเมตริกซ์สีของอนุภาคเมฆที่ถูกสร้างขึ้น โดยผู้วิจัยได้กำหนดให้ว็อกเซล (voxel) เป็นชื่อมาตรฐานในการเรียก และนับเรียงลำดับกันตั้งแต่ Voxel 0 เป็นต้นไปหากไม่มีการแก้ไข

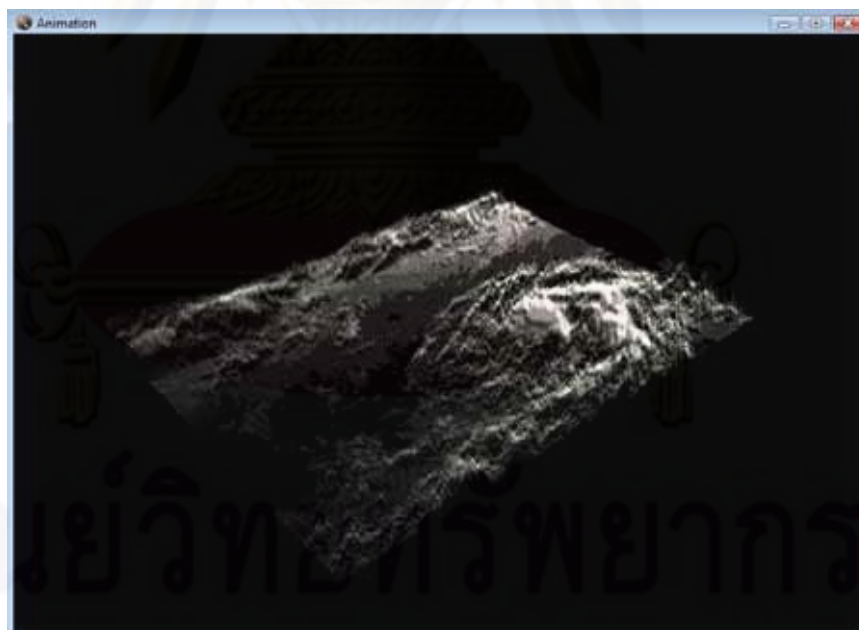
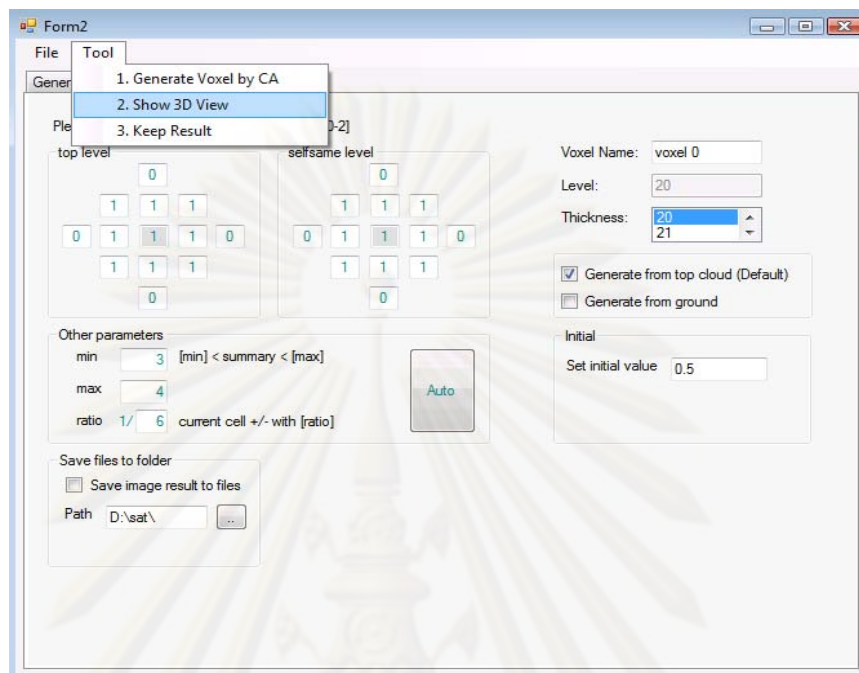
6.5) การเลือกกำหนดลำดับชั้นตั้งต้นที่จะเริ่มต้นสร้าง โดยสามารถเลือกสร้างขึ้นเมฆจากลำดับบนสุด หรือจากลำดับล่างสุด

6.6) ค่าเริ่มต้นของอนุภาคเมฆทั้งหมดในลำดับชั้นตั้งต้น โดยปกติจะกำหนดค่าเริ่มต้นของอนุภาคเมฆเป็น 0.5

7. เมื่อกำหนดค่าต่าง ๆ ตามต้องการแล้ว ในขั้นตอนการสร้างภาพจำลองสามมิติของเมฆจะต้องเลือกเมนู **Generate Voxel by CA** ในเมนูหลักที่ชื่อ Tool ก่อน เพื่อให้โปรแกรมคำนวณและสร้างค่าสีของอนุภาคเมฆทั้งหมดในการแสดงผลสามมิติ

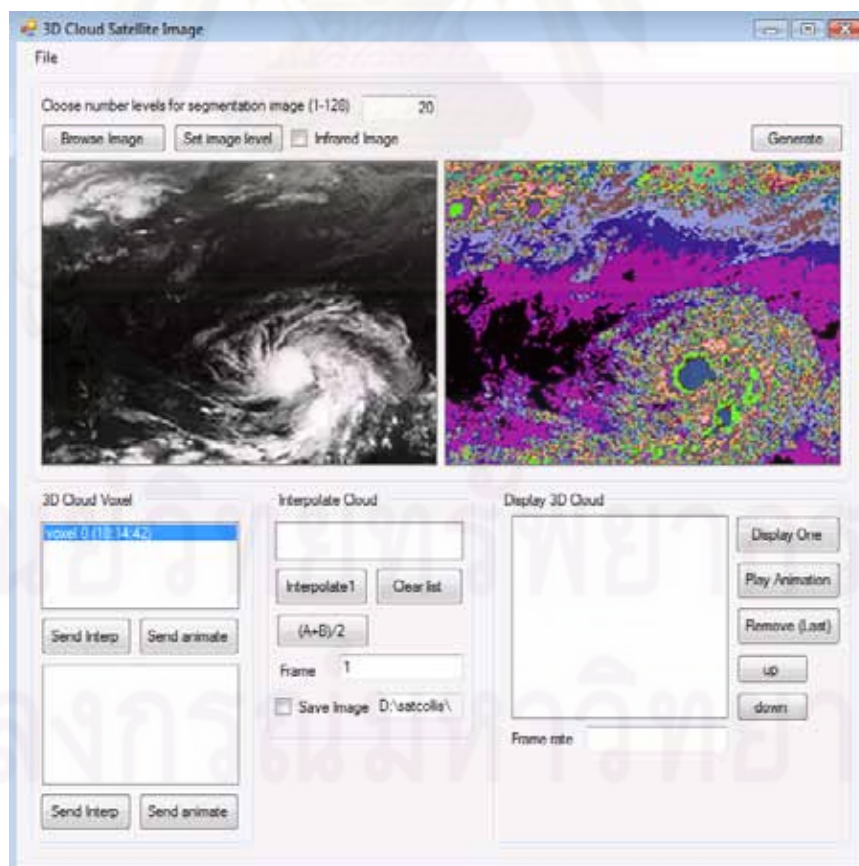
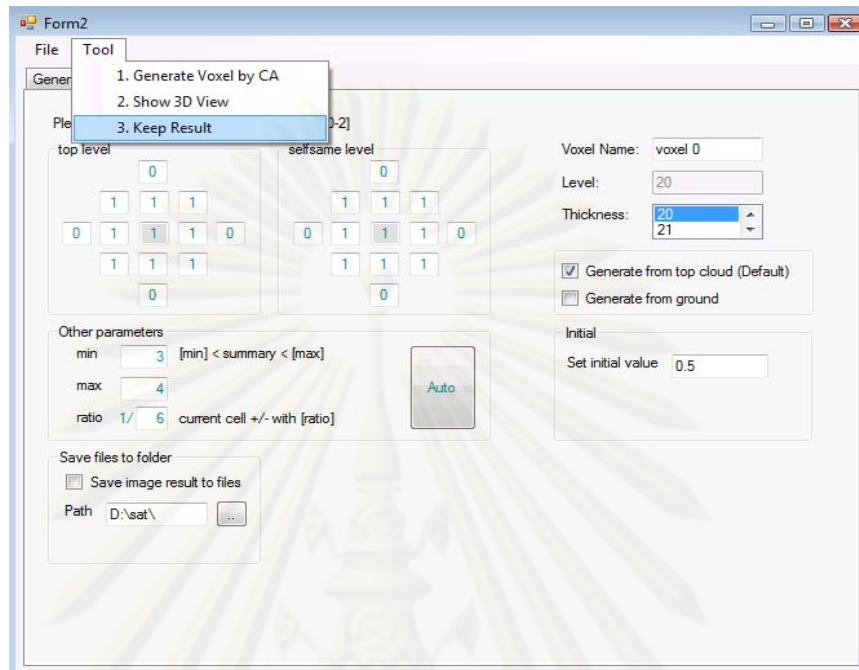


8. เลือกเมนู **Show 3D View** เพื่อแสดงผลภาพเมฆ

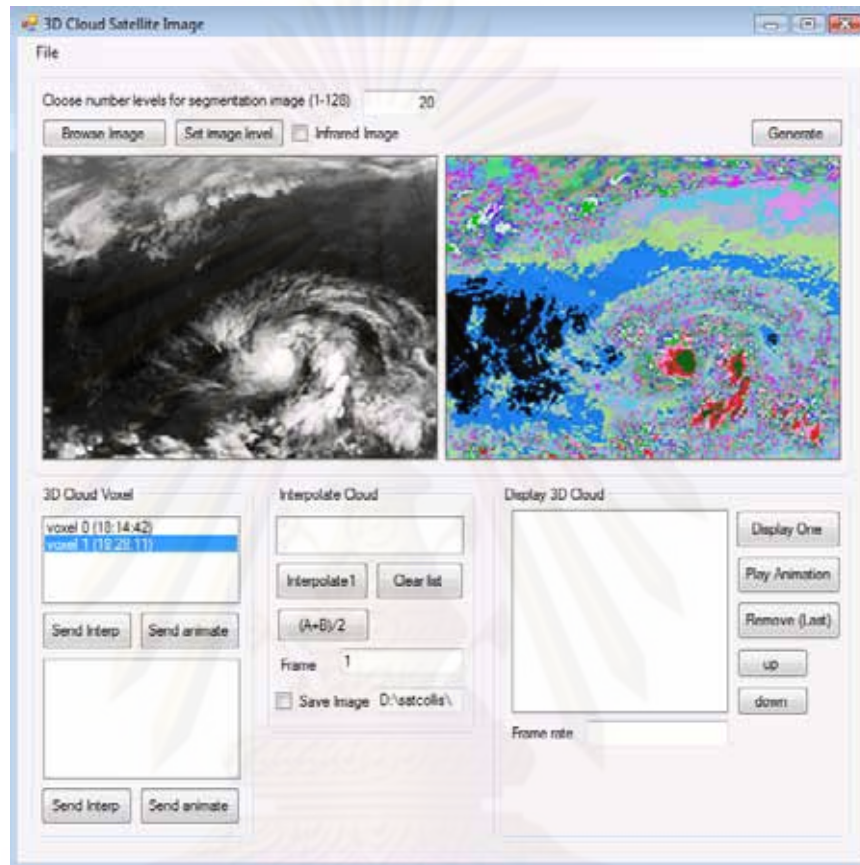


ศูนย์วิจัยคอมพิวเตอร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

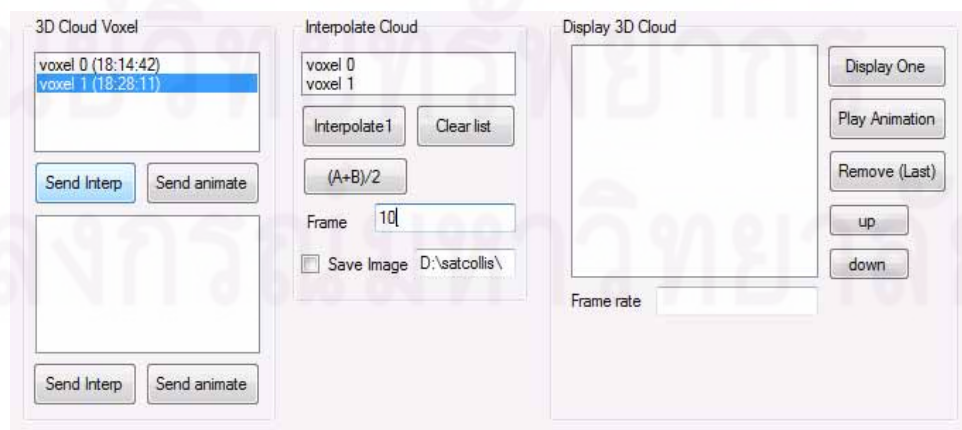
9. เลือกเมนู **Keep Result** เพื่อเก็บข้อมูลสามมิติที่สร้างขึ้นในโปรแกรม



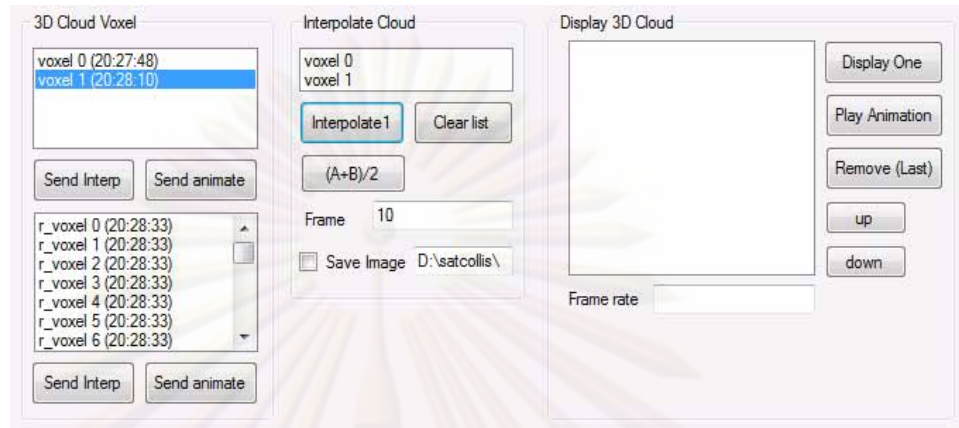
10. นำเข้าข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมอีกภาพหนึ่ง (โดยต้องมีขนาดเท่ากัน และมีจำนวนชั้นเท่ากัน) แล้วสร้างข้อมูลสามมิติด้วยวิธีการเช่นเดียวกับภาพถ่ายดาวเทียมภาพแรก เพื่อนำข้อมูลทั้งสองชุดมาสร้างเป็นภาพเคลื่อนไหวของเมฆในสามมิติ



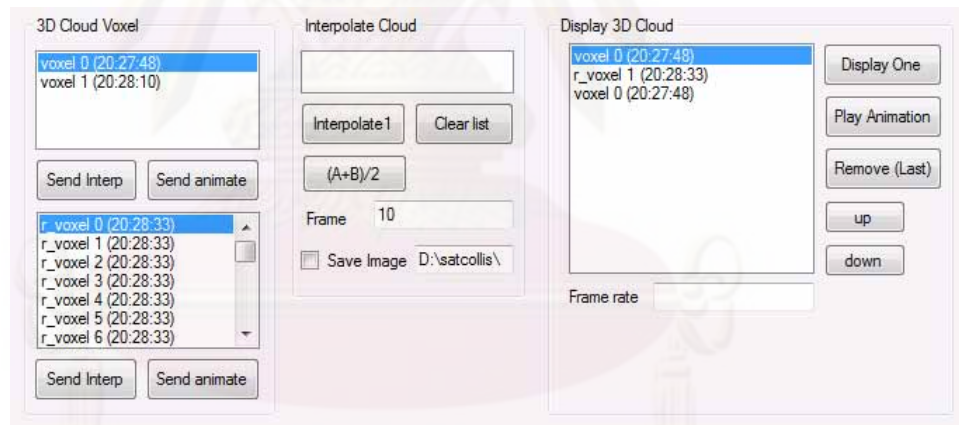
11. เลือกข้อมูลที่ต้องการนำไปสร้างภาพเคลื่อนไหว โดยเรียงลำดับภาพที่ต้องการให้เป็นภาพต้นทาง และภาพปลายทาง กดปุ่ม **Send Interp** เพื่อส่งเข้าไปที่กล่องรายชื่อ **Interpolate Cloud**



12. เลือกกดปุ่มวิธี Interpolate ที่ต้องการ พร้อมระบุค่าเฟรมในกล่องข้อความ (frame) เพื่อนำไปคำนวณจำนวนภาพที่ต้องการแสดง



13. สามารถแสดงผลภาพแอนิเมชันของลำดับข้อมูลที่ได้โดยการส่งไปยังกล่องรายชื่อ **Display 3D Cloud** แล้วเลือกกดปุ่ม Display One สำหรับแสดงภาพสามมิติที่เลือกหรือกดปุ่ม Play Animation เพื่อแสดงลำดับภาพสามมิติทั้งหมดที่อยู่ในรายการ



14. ควบคุมมุมมองของภาพสามมิติโดยใช้เมาส์ และแป้นตัวอักษร A, S, W, D ในลักษณะเดียวกับการควบคุมเกมส์



ภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รหัสเทียม (Pseudo-code) ของขั้นตอนวิธีคอร์-อินครีเมนต์

```

proc core-increment
  // Loading of volumes and tests
  Load source volume as srcVol;
  Load target volume as tgtVol;
  If ( dimension(srcVol) != dimension(tgtVol) )
    print error and exit endif
  Create core with dimensions of srcVol
  // Initialization of core
  for each voxel position (i,j,k)
    if ( both tgtVol and srcVol's has object present)
      add (i,j,k) to the core at (i,j,k)
    endif
  end for
  // Iteration to create add and delete arrays
  do
  for each non-empty voxel position (i,j,k) in core
    if voxel found surrounding (i,j,k) in srcVol
      add to core at (i,j,k)
      add (i,j,k) to del-array
    end if
    if voxel found surrounding (i,j,k) in dstVol
      add to core at (i,j,k)
      add (i,j,k) to add-array
    end if
  end for
  until core cannot increment further
  Load source volume as morphVol
  // Morph iterations.
  for i = 0 to sizeof(add-array)
    // iterating through the add-array
    get position at add-array[i] as (i,j,k)
    add voxel at (i,j,k) to morphVol
    // iterating through del-array in reverse
    get position at del-array[size(add-array)-i] as (i,j,k)
    add voxel at (i,j,k) to morphVol
    // Rendering the deformed volume
    Render morphVol
  endfor
endProc

```

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รหัสเทียม (Pseudo-code) ของแบบจำลองการเติบโตของแบคทีเรีย

```

Proc core-increment
  // Loading of volumes and tests
  Load source volume as srcVol;
  Load target volume as tgtVol;
  if ( dimension(srcVol) != dimension(tgtVol) )
    print error; exit;
  endif
  for each non-empty voxel position (i,j,k) in srcVol
  do
    if (voxel at position (i,j,k) is non-empty )
      // food at current position
      if ( voxels surrounding (i,j,k) have a
        non-empty position (i1,j1,k1) )
        reproduce by placing copy of voxel at
        (i,j,k) in (i1,j1,k1) with probability p1.
      else if (not completely surrounded by
        voxels at position (i,j,k) )
        die by removing voxel at (i,j,k)
        with probability p2
      endif
    endif
  render srcVol;
enddo
end core-increment

```

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวณัฐวีร์ ไควสุวรรณ เกิดเมื่อวันที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2526 เข้าเรียนระดับชั้นอนุบาลและประถมศึกษาที่โรงเรียนสันติสุขวิทยา ต่อมาสำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนสตรีวิทยา 2 ก่อนเข้าศึกษาระดับอุดมศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในสาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ และสำเร็จการศึกษาเมื่อปีพ.ศ. 2547 จากนั้นเข้าร่วมงานกับบริษัทโพธิ์ธิเนทในตำแหน่งนักพัฒนาซอฟต์แวร์ โดยมีหน้าที่สุดท้ายเป็นเอาร์ทเซอร์สให้กับธนาคารแห่งประเทศไทย และศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระหว่างการศึกษาก็ได้จัดตั้งกลุ่มเครือข่ายเลิฟเอิร์ท เพื่อถ่ายทอดแลกเปลี่ยนวิถีทางในการแสดงความคิดเห็นและตอบแทนโลกที่เราพึ่งพิงอาศัย ภายหลังได้จัดพิมพ์หนังสือ “รวมเรื่องสั้นวันโลกยึด” ที่รวบรวมงานเขียนลักษณะโลกยึดจากนักเขียนมืออาชีพและมือสมัครเล่น

ในปีพ.ศ. 2551 ได้มีโอกาสร่วมฝึกงานที่สถาบัน National Institute of Informatics (NII) ณ กรุงโตเกียว ประเทศญี่ปุ่นเป็นเวลา 3 เดือนภายใต้การดูแลของผู้ช่วยศาสตราจารย์ คิตาโมโตะ อะซาโนบุ ซึ่งหลังกลับสู่ประเทศไทยจำเป็นต้องช่วยงานด้านเทคโนโลยีให้สำนักพิมพ์ ณ บ้านวรรณกรรม เป็นเวลาประมาณ 1 ปี และได้ร่วมกันเขียนต้นฉบับหนังสือ “ปรัชญามหาสมุทร” กับวิษณั แทนบุญ (วิษณั แทนบุญช่วย) ก่อนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ในปีการศึกษา 2552 ซึ่งเป็นปีที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ปัจจุบันได้เข้าร่วมงานกับบริษัท เซลเลนเนียม (ประเทศไทย) จำกัด เพื่อวิจัยและผลิตระบบพลังงานสะอาดหมุนเวียน

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย