

การจำลองภาพพรหมทอมือด้วยเทคนิคคอมพิวเตอร์ กราฟฟิก*

จรัส จีระวิพลวรรณ¹⁾ รุจชัย อึ้งอรุณยะวิ²⁾ และ วสุ เซาร์พานนท์³⁾

- ¹⁾ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 4002
²⁾ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002
³⁾ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

Email: neojeera@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเทคนิคในการจำลองภาพพรหมทอมือโดยบูรณาการเทคนิคต่างๆมาปรับปรุงให้เหมาะกับภาพพรหม ลดทอนความซับซ้อนของระบบจำลองภาพลง และนำเอาระบบจำลองอนุภาคมาใช้ในการสร้างโครงสร้างควบคุมเส้นพรหมบนพื้นผ้าใบ แล้วนำโครงสร้างที่ได้มาสร้างเป็นแนวเส้นใหม่ ต่อมาจึงสร้างภาพตัดขวางของเส้นไหมซึ่งเรียกว่า ลูมิสไลซ์ ขึ้นมาและให้ ลูมิสไลซ์วิ่งวนไปตามแนวเส้นที่ได้ทั้งหมดพร้อมกับบิดเกลียวตามลักษณะที่ต้องการ ในระหว่างการสร้างลูมิสไลซ์จะมีการกำหนดค่าสีของพรหมลงไปตามค่าสีพรหมต้นแบบ ในส่วนการตัดแต่งระดับความสูงระบบจะทำการอ่านค่าภาพระดับความสูงเพื่อมาควบคุมการวาดลูมิสไลซ์ว่าควรจะวาดตรงตำแหน่งไหนในแนวเส้นที่สร้างเพื่อให้เป็นไปตามรูปแบบที่กำหนดไว้และทำให้เกิดภาพพรหมจำลองในลักษณะต่างๆตามต้องการ

ผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถรองรับภาพพรหมที่มีสีได้ถึง 16.7 ล้านสี รองรับจำนวนชั้นภาพได้ 24 ชั้น รองรับการปรับระดับความสูงต่ำของบริเวณต่างๆบนพรหมได้สูงสุด 256 ระดับและรองรับจำนวนเส้นใยได้สูงสุดที่ 400×400 เส้นใยในระบบทดสอบ ระบบสามารถสร้างภาพจำลองได้โดยใช้เวลาน้อยกว่า 1 วินาทีที่ ความหนาแน่นเส้นใยไม่เกิน 80×80 เส้นใยด้วยเครื่องที่มีหน่วยประมวลผล Celeron ความเร็ว 2.0 GHz และหน่วยความจำ 512 MB ขึ้นไป

คำสำคัญ : ระบบอนุภาค, ภาพระดับความสูง, ลูมิสไลซ์

* รับผิดชอบฉบับเมื่อวันที่ 21 ธันวาคม 2549 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 2 เมษายน 2550

Hand-Tufted Carpet Simulation by Computer Graphic Techniques*

Charat Jeeravipoolvarn¹⁾ Rujchai Ung-arunyawee ²⁾ and Wasu Chaopanon³⁾

¹⁾ Student, Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University 40002

²⁾ Lecturer, Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University 40002

³⁾ Lecturer, Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University 40002

Email: neojeera@yahoo.com

ABSTRACT

This research presents a technique to simulate picture of hand-tufted carpet by integrating, modifying and simplification many interesting techniques in computer graphics. This research uses particle system to generate dynamic particles moving over the carpet plane. All particle positions are used as a control structure of curve creation. A primitive structure, called Lumislice, is created and transformed along each curve to make yarn twisted. And define color of carpet from photo type during creating Lumislice. In cutting yarn level process we use height map to control position of each slice in yarn curve to produce final image.

The result image can represent 16.8 million colors and contain maximum 24 lumislices for each line. This system support 256 cut height level. And support maximum density 400×400 yarn in test system. This system can create image of carpet wish density of yarn is lower than 80×80 lines in 1 second or less in 2.0 GHz Celeron processor with 512 MB of RAM.

Keywords : Particle System, Height Map, Lumislice

* Original manuscript submitted: December 21, 2006 and Final manuscript received: April 2, 2007

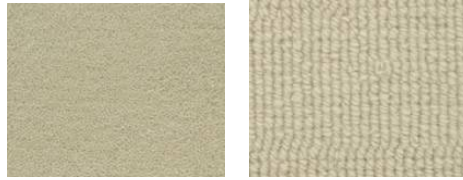
บทนำ

พรมทอเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีราคาต้นทุนการผลิตสูงและใช้เวลาในการผลิตนานกว่าพรมที่ทอด้วยเครื่องจักร เมื่อทำการผลิตแล้วไม่สามารถแก้ไขลวดลายและสีของพรมได้อีก ฉะนั้นการจำลองภาพพรมที่มีลักษณะเหมือนจริงด้วยคอมพิวเตอร์จึงเป็นประโยชน์ต่อผู้ผลิตพรมในการลดการสูญเสียต้นทุนการผลิตและเวลา นอกจากนี้ยังสามารถช่วยเพิ่มความพึงพอใจแก่ลูกค้าได้อีกด้วย

การสร้างภาพจำลองของพรมทอให้เหมือนจริง ยังไม่มีงานวิจัยใดกล่าวถึง ที่สืบค้นได้จะเป็นการสร้างภาพขนของสัตว์ (Fur) ผมของคน (Hair) และผ้าที่ถักด้วยไหมพรม (Knitwear) ซึ่งในระยะแรก ของงานวิจัยทางด้านนี้ การสร้างแบบ (Modeling) และแสดงภาพ (Rendering) จำลองขนและผมจะใช้วิธีการใช้สร้างโพลีกอน (Polygon) จำนวนมากมาประกอบกันเป็นเส้นขนหรือผมแต่ละเส้น (Anjyo et al., 1992, Miller et al., 1988, Rosenblum et al., 1991) แต่วิธีการแบบนี้จะมีข้อเสียคือเสียเวลาในการประมวลผลมากและเกิดปัญหา aliasing ขึ้นเสมอ ต่อมาวิธีการ Fakefur สามารถแสดงภาพเหมือนจริงของขนสัตว์ที่มีลักษณะสั้น ๆ โดยอาศัยหลักการทางสถิติในการให้แสงแก่ภาพ วิธีการนี้ถูกนำมาเสนอ และใช้สำหรับการจำลองภาพขนของเหล่าสุนัขในภาพยนตร์เรื่อง 101 Dalmatians (Dan B. G., 1996) ขณะที่ Graftal textures (Michael, A., 1999) และ Lapped textures (Lengyel, J., 2001) ถูกนำมาใช้ได้อย่างดีผลในการแสดงผลภาพและการเคลื่อนไหวเหมือนจริงแบบ real-time ของทุ่งหญ้า ใบไม้บนต้น หรือขนสัตว์ที่มีลักษณะเป็นเส้นยาว ๆ ตัวอย่างเช่น ขนกระต่าย เป็นต้น สำหรับเส้นผมของมนุษย์มีการนำเสนอ Thin Shell Volume (Tae-Yong Kim, 2000) ขึ้นมาเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการสร้างแบบและแสดงภาพจำลองเหมือนจริงของผมของคนเราในทรงผมมีลักษณะแตกต่างกันได้มากมาย ส่วนการสร้างแบบและการแสดงภาพของผ้าไหมพรมถักเหมือนจริง ได้มีการจำลองหน่วยพื้นฐานของเส้นไหมพรมจริงที่เรียกว่าลูมิสไลซ์ (Yanyun Chen et al., 2003) ขึ้นมาเพื่อใช้ในการสร้างภาพผ้าไหมพรมถักที่มีลักษณะเหมือนจริงได้ทั้งที่เป็นภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหว

พรมทอโดยพื้นฐานทั่วไปแล้วจะถูกแบ่งตามลักษณะวิธีการทอออกได้เป็น 2 แบบหลัก ๆ คือ 1) พรมแบบ Cut ที่เกิดจากการทอที่มีการตัดปลายด้านบนของเส้นไหมพรมที่นำมาทอ (Yarn) เมื่อทอเสร็จทั้งผืนแล้วก็จะมีการตัดแต่งระดับความสูงตามที่กำหนดในแบบด้วยกรรไกรปัตตาเลื่อน 2) พรมแบบ Loop เกิดจากการทอที่ไม่มีการตัดปลายด้านบนของเส้นไหมพรม แต่จะใช้วิธีม้วนเส้นไหมให้โค้งลงไปเก็บปลายไว้ข้างล่างผืนพรมแทน เมื่อทอเสร็จทั้งผืนจะไม่มีมีการตัดแต่งระดับความสูงด้วยกรรไกร พรมทั้งสองแบบจะมีลักษณะ texture ที่ปรากฏแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 1

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการพัฒนาเทคนิคเพื่อใช้สร้างแบบ จำลองและแสดงภาพจำลองให้เหมือนจริงของพรมทอที่เป็นแบบ Cut เท่านั้น โดยสามารถรองรับการใช้สีได้หลายสีในพรมผืนเดียวที่มีการตัดแต่งระดับความสูงที่แตกต่างกันหลายระดับได้



รูปที่ 1 แสดงลักษณะ texture ของพรมทอมือแบบ Cut (หยาบ) และแบบ Loop (ขรุขระ)

ทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การสร้างภาพ 3 มิติ

ในกระบวนการสร้างภาพ 3 มิตินั้น องค์ประกอบพื้นฐานที่ใช้ในการทำงานก็คือจุดและเส้น หากทำการเชื่อมต่อจุดหลายๆจุดด้วยเส้นแล้ว ก็จะสามารถทำให้เกิดเป็นระนาบโพลีกอนได้ และการนำโพลีกอนหลายๆรูปมาประกอบกันก็จะทำให้เกิดรูปทรงต่างๆในลักษณะ 3 มิติได้

เมื่อต้องการแสดงรายละเอียดหรือลวดลายบนพื้นผิวของรูปทรง 3 มิติที่สร้างขึ้นมาให้ดูเหมือนผิวของวัตถุจริงก็สามารถทำได้ด้วยการใช้เทคนิคการปะภาพ 2 มิติลงไปบนผิววัตถุ 3 มิติหรือที่เรียกว่าการทำเทกซ์เจอร์แมป (Texture Mapping) โดยที่ขนาดและตำแหน่งในการวางเทกซ์เจอร์สามารถกำหนดได้ตามความเหมาะสม (Foley, V., 1990, Donald, H., 1996)

2. Bezier Curve

Bezier Curve (Bezier, P., 1974) เป็นเส้นโค้งที่ได้รับความนิยมใช้งานอย่างกว้างขวางในงานด้านคอมพิวเตอร์กราฟฟิก เนื่องจากมีรูปแบบมาตรฐานที่ง่ายต่อการใช้งานและเหมาะสำหรับการนำไปใช้กับระบบที่ทำงานในลักษณะโต้ตอบกับผู้ใช้งาน

เส้นโค้งชนิดนี้มีลักษณะทั่วไปคือเป็นเส้นโค้งที่เกิดขึ้นจากจุดควบคุม (ความโค้งและความต่อเนื่อง) หลายจุด P_0, P_1, \dots, P_n ซึ่งเราเรียกเส้นโค้งนี้ว่ามีอันดับเท่ากับ n และเราสามารถหาตำแหน่งจุดใดๆ $P(t)$ บนเส้นโค้งนี้ได้จากสมการ

$$P(t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i P_i \quad (1)$$

เมื่อ $0 \leq t \leq 1$ และ $\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$ กรณีพิเศษคือ กรณีที่ 1) เมื่อ $n = 2$ เส้นโค้งจะมีจุดควบคุม 3

จุดและจะเรียกว่าเป็น Quadratic Bezier curve กรณีที่ 2) เมื่อ $n = 3$ เส้นโค้งจะมีจุดควบคุม 4 จุดในระนาบ 3 มิตินั้นจะเรียกว่าเป็น Cubic Bezier curve วิธีการวาดเส้นโค้งชนิดนี้อยู่บนแนวคิดการทำ Subdivision

3. ระบบอนุภาค (Particle system)

ระบบอนุภาคเป็นวิธีการสำหรับสร้างแบบและแสดงภาพวัตถุหรือสิ่งต่าง ๆ ที่มีรูปลักษณะไม่แน่นอนเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (Reeves, W.T., 1983) ตัวอย่างเช่น เปลวไฟ ก้อนเมฆ กลุ่มควัน เป็นต้น รวมไปถึงเทคนิคในการทำภาพเคลื่อนไหวแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เกิดขึ้นตลอดเวลาซึ่งไม่สามารถดำเนินการได้โดยวิธีการอื่น ๆ ที่เคยใช้มาก่อน

การสร้างแบบและแสดงภาพของระบบอนุภาคมีข้อแตกต่างจาวีธีการอื่น ๆ ทั่วไปอยู่ 3 ข้อ ได้แก่ 1) ขอบเขตและรูปร่างของวัตถุเกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นกลุ่มของอนุภาคพื้นฐาน ไม่ได้เกิดจากการประกอบกันของพื้นผิวเล็ก ๆ เหมือนเช่นในวิธีการอื่น ๆ 2) ระบบอนุภาคเป็นระบบที่ไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงและเคลื่อนที่ตลอดเวลา มีการเกิดอนุภาคใหม่และมีการตายของอนุภาคเก่า 3) ขบวนการสุโตแคสติก (Stochastic processes) ถูกนำมาใช้ทั้งในการสร้างระบบและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของระบบ

อนุภาคในระบบจะมีคุณสมบัติประจำตัว เช่น ตำแหน่ง ขนาด รูปร่าง ความเร็ว (ทั้งขนาดและทิศทาง) อายุ สี และอายุขัย (Lifetime) เป็นต้น จำนวนคุณสมบัติของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับระบบที่ถูกจำลอง การแสดงภาพอนุภาคเหล่านี้จะแสดงด้วยองค์ประกอบทางกราฟฟิกพื้นฐาน เช่น จุดและเส้น หรืออาจจะแสดงด้วยรูปร่างที่ซับซ้อนก็ได้ วงจรชีวิตของอนุภาคในระบบแบ่งออกเป็น 3 ระยะคือ

1. ระยะ Generation เป็นระยะการกำเนิดอนุภาคใหม่ให้แก่ระบบ
2. ระยะ Dynamic เป็นระยะที่มีปรับสถานภาพของอนุภาคไปตามตัวแปรต่างๆที่ระบุเอาไว้
3. ระยะ Extinction เป็นระยะที่อนุภาคจะตายและหายไปจากระบบ

4. Displacement Mapping

การทำให้วัตถุมีลักษณะพื้นผิวตามภาพระดับที่ต้องการ เป็นกระบวนการอ่านค่าสีจากภาพระดับ (height map) หลังจากนั้นทำการ Subdivision เพื่อเพิ่มจำนวนโพลิกอนแล้วจึงปรับตำแหน่งของ Vertex ให้มีความสูงต่ำตามระดับความเข้มของสี ซึ่งจะส่งผลให้เกิดลักษณะพื้นผิวของวัตถุจริงๆ วิธีการนี้สามารถในการให้รายละเอียดพื้นผิวที่สูงขึ้น มีความสมจริงเพราะมีปรับโมเดล 3 มิติในระดับ Vertex (Foley, V., 1996, Donald, H., 1996)

5. Lumislice

Yanyun Chen และคณะได้ทำการวิจัยเพื่อสร้างโมเดลในการจำลองภาพใหม่พรมถักซึ่งในงานวิจัยขั้นนี้ได้นำเสนอเทคนิคการแสดงผลโดยอาศัยลูมิสไลซ์ (Lumislice Base Rendering) ซึ่งเทคนิคนี้ทำการสร้างภาพใหม่พรมถักจากภาพตัดขวาง 2 มิติพื้นฐานที่เรียกว่า ลูมิสไลซ์ (Lumislice) ที่วิ่งวนไปบนโครงสร้างของเส้นไหมพรมถัก ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3 โดยที่โครงสร้างของเส้นไหมพรมถักจะถูกกำหนดตามแบบของการถัก (Stitching pattern) อีกทั้งเทคนิคนี้ยังสามารถสร้างภาพที่มีรายละเอียดได้ทั้งในระดับใกล้และไกลด้วย (Yanyun Chen et al., 2003)

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการจะสร้างแบบจำลองนี้เราได้ทำการศึกษาการทอพรอมและเทคนิคในการสร้างภาพ แล้วนำเทคนิคต่างๆมาปรับปรุงให้เกิดระบบดังนี้

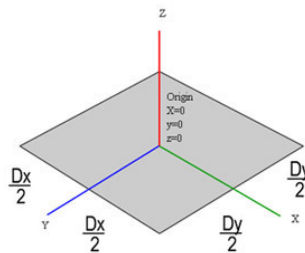
1. การศึกษาเก็บข้อมูลที่โรงงานผลิตพรอม

ในงานวิจัยนี้เราได้เข้าไปเก็บข้อมูลในการผลิตพรอม ณ โรงงานพรอมทอมือแห่งหนึ่งในจังหวัดขอนแก่น พบว่าในกระบวนการผลิตพรอมนั้นจะมีขั้นตอนตามแสดงในแผนภูมิในรูปที่ 3 (ซ้าย) โดยเริ่มจากการออกแบบลวดลายและกำหนดสีของพรอม แล้วจึงจะนำภาพแบบที่ได้ไปวาดลงบนผืนผ้าใบ จากนั้นก็ทำการทอพรอมด้วยปั่นยิงไหมสีต่างๆตามลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ หลังจากทอเสร็จสิ้นทั้งผืนแล้วจึงนำพรอมที่ได้ไปตัดแต่งระดับความสูงของลวดลายตามแบบอีกครั้งหนึ่ง แล้วจึงทำการบรรจุส่งให้แก่ลูกค้า

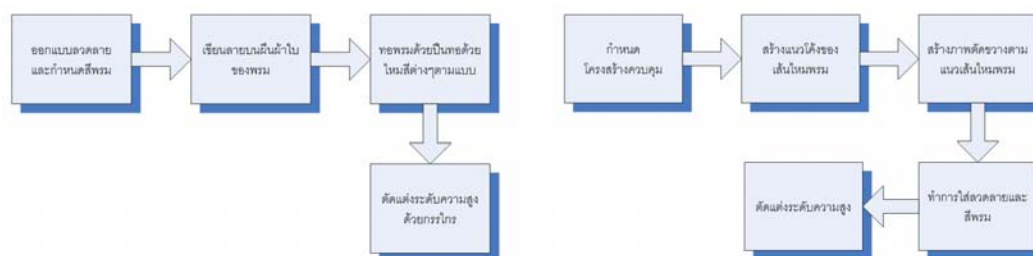
2. แนวความคิดของระบบจำลองภาพพรอม

ในการสร้างภาพนี้เราได้กำหนดให้มีการสร้างระนาบเริ่มต้นสำหรับการสร้างภาพ ซึ่งในแบบจำลองนี้เราให้ระนาบดังกล่าวถูกสร้างขึ้นที่จุดเริ่มต้น $(0, 0, 0)$ ของพิกัดในโลก 3 มิติโดยมีขนาดเป็นสี่เหลี่ยมที่สมมาตรทั้งแกน x และ y โดยมีรูปแบบดังภาพที่ 2

เมื่อได้ระนาบเริ่มต้นที่แทนผืนผ้าใบของพรอมจริงแล้ว ก็จะดำเนินการตามขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ 3 (ขวา) โดยจะทำการกำหนดโครงสร้างหลักสำหรับควบคุมลักษณะแนวโค้งของเส้นไหมพรอมแต่ละเส้นบนพรอม จากนั้นนำค่าของโครงสร้างควบคุมที่ได้ไปสร้างแนวเส้นไหมพรอมทั้งหมดแล้วจึงทำการสร้างภาพตัดขวางของเส้นไหมพรอมที่ใช้ทอตามแนวของเส้นไหมพรอม ต่อจากนั้นก็ทำการใส่ลวดลายและสี และขั้นตอนสุดท้ายก็จะเป็นการตัดแต่งระดับความสูงพรอมตามที่แบบกำหนด



รูปที่ 2 แสดงระนาบขอบเขตเริ่มต้นของพรอมจำลองที่มีขนาดในแนวแกน x และ y เท่ากับ Dx และ Dy ตามลำดับ



รูปที่ 3 ซ้ายแสดงแผนภูมิการทำงานของกระบวนการผลิตพรม ขวาแผนผังแสดงกระบวนการจำลองพรมทอมือในโรงงานพรมทอมือในจังหวัดขอนแก่น

3. การกำหนดโครงสร้างควบคุม

โครงสร้างควบคุมหมายถึงกลุ่มข้อมูลที่ถูกนำไปใช้ในการระบุตำแหน่งและแนวโค้งของเส้นใหม่ แต่ละเส้นบนพรม ในงานวิจัยนี้ใช้ระบบอนุภาคกำหนดโครงสร้างควบคุม เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูง สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมของลักษณะงาน และในงานวิจัยนี้ได้ปรับรูปแบบของระบบอนุภาคให้มีการทำงานดังนี้คือ กำหนดให้ Emitter หมายถึงระนาบที่จะใช้สร้างอนุภาคและให้อายุ (Age) ของอนุภาคที่เกิดขึ้นมามีได้เพียง 4 ค่าเท่านั้นซึ่งมีผลทำให้เกิดจุดควบคุม 4 จุดตามแนวความสูงของเส้นใหม่ แต่ละเส้นใหม่จะมีตำแหน่ง (Position) ของการวางตัวอยู่ภายในขอบเขตพื้นที่เล็กที่สุดที่เส้นใยสามารถเคลื่อนที่ได้ เรียกว่า Particle Boundary และในแต่ละระดับความสูงของเส้นใยจะมีการคำนวณหาค่าที่ใช้ในการระบุความเข้มของสีพรมในบริเวณด้านบนจะมีสีปกติและบริเวณด้านล่างสีจะเข้มขึ้นซึ่งได้จากค่าอายุของอนุภาคหากอายุมากก็จะมีค่าสีปกติหากอายุน้อยสีจะเข้มขึ้นซึ่งจะแสดงผลในขั้นตอนการแสดงผล

วิธีการสร้างอนุภาคทำได้โดยการกำหนด Translation Matrix T ที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในลักษณะแบบสโตแคสติก (Stochastic process) ที่มีค่าความยุ่งเหยิง (Variation) คงที่ นั่นคือกำหนดให้

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

เมื่อ

$$T_x = \text{variation} \times \text{random}_{t=1} \times \text{size of boundary} / 2$$

$$T_y = \text{variation} \times \text{random}_{t=2} \times \text{size of boundary} / 2$$

ซึ่งถ้ากำหนดให้ $P_o = [X_o \ Y_o \ 1]^T$ เป็นตำแหน่งในระบบพิกัดแบบโฮโมจีเนียสของอนุภาค ณ ศูนย์กลางของขอบเขตที่อนุภาคให้มีอนุภาคเกิดได้ (Particle boundary) แล้วจะได้ว่าตำแหน่งของอนุภาคที่สร้างเป็นดังนี้

$$P = T \times P_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ส่วนอายุของอนุภาคในระบบนี้ จะถูกกำหนดให้มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยค่าคงที่ ซึ่งสามารถแสดงได้ตามสมการ (4) ข้าง ล่าง

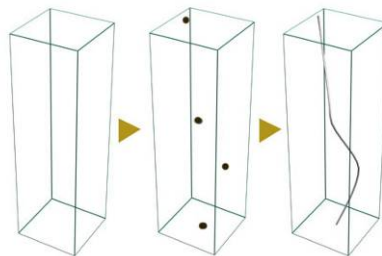
$$Age = Age + \frac{\max_age}{\max_cp} \quad (4)$$

เมื่อ

\max_age คือ ค่าคงที่อายุสูงสุดที่เป็นไปได้ของอนุภาค
 \max_cp คือ ค่าคงที่จำนวนของจุดควบคุม

4. การจำลองแนวเส้นใหม่พรอม

หลังจากที่ได้โครงสร้างควบคุมแล้วต่อมาคือการสร้างแนวเส้นใหม่โดยสร้างเป็นเส้นโค้งที่ใช้ข้อมูลจากจุดควบคุม 4 จุดและใช้ทฤษฎี Bezier Curve ที่ได้กล่าวไปก่อนแล้ว จุดทั้ง 4 ที่ได้มาจากโครงสร้างควบคุมนั้นเป็นจุดควบคุมความโค้งของเส้น เพื่อให้ได้เส้นโค้งที่อยู่ใน Particle Boundary ดังรูปที่ 4 ไปเรื่อยๆจนครบทุกเส้นในโครงสร้างควบคุม ตำแหน่งต่างๆที่อยู่บนเส้นโค้งที่ได้ในขั้นตอนนี้จะถูกใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดตำแหน่งการวาดระนาบลูมิสไลซ์ ต่อไป



รูปที่ 4 แสดงรูปแบบการจำลอง Particle บน Emitter และแนวเส้นใหม่พรอมหนึ่งเส้น

5. การสร้างเส้นปมใหม่ของพรอม

แนวความคิดในการพัฒนาจะเป็นลักษณะเดียวกับลูมิสไลซ์ คือให้เส้นใยเหล่านี้เกิดจากการรวมกันของเส้นใหม่เล็กๆแล้วบิดเกลียว แต่ในงานชิ้นนี้ได้ลดทอนความซับซ้อนของเทคนิคดังกล่าวลงเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้ง่ายขึ้น แต่ยังคงสร้างภาพตัดขวางของปมใหม่ในลักษณะของการหมุนบิดเกลียวของเส้นใยเพื่อให้รายละเอียดของภาพ

ขั้นตอนการสร้างภาพตัดขวางจะใช้วิธีการดังนี้

1. สร้างรูปแบบภาพตัดขวางของเส้นใหม่ 1 เส้น (หน่วยที่เล็กที่สุดในการแสดงผล)
2. ทำการวาดภาพตัดขวางของเส้นปมใหม่ (ภาพที่รวมเส้นใหม่เข้าเป็นปมที่จะใช้ทอ)
3. ทำการบิดเกลียวเส้นปมใหม่ตามลำดับความสูง

ในกระบวนการนี้ เราพัฒนาให้ระบบมีลักษณะที่ยืดหยุ่นโดยทั้ง 3 ขั้นตอนนั้นสามารถปรับเปลี่ยนหรือปิดการใช้งานบางหัวข้อตามลักษณะของปมใหม่ได้ เพื่อสำหรับกรณีที่มีปมใหม่บางลักษณะที่เป็นทรงกระบอกหนาและไม่มีก้นก็ยังสามารถปรับใช้งานได้ และถ้าปมใหม่มีความซับซ้อนก็สามารถที่จะทำงานได้ ซึ่งไม่ส่งผลต่อโครงสร้างการทอหรือระดับความสูงรวมทั้งสีของพรมด้วย

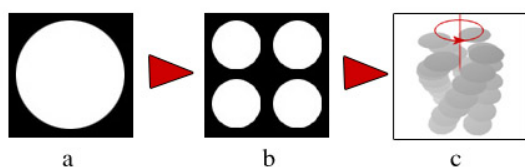
ขั้นตอนที่ 1 การสร้างภาพตัดขวางเส้นใหม่สามารถเป็นลักษณะภาพ 2 มิติแสดงภาพตัดขวางใด ๆ ก็ได้ตามต้องการโดยจะต้องให้มีสีเริ่มต้นเป็นสีขาวเป็นส่วนที่จะแสดงผล และส่วนที่เป็นการให้ค่าโปร่งใส ซึ่งในกรณีการทดสอบเราใช้รูปวงกลมแทนเส้นใหม่

ในขั้นตอนที่ 2 ระบบจะวาดภาพตัดขวางของเส้นใหม่ลงในลูมิสไลซ์ ตามแนวการวางตัวของเส้นใหม่ในปมใหม่ในลักษณะต่างๆ โดยการ Translation ภาพเส้นใหม่ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ไปบนตำแหน่งต่างๆในระนาบลูมิสไลซ์ หากว่าปมใหม่เป็นแบบปมใหญ่ปมเดียวก็จะทำการวาดเพียงปมเดียว บนจุดศูนย์กลางของลูมิสไลซ์ ในขั้นตอนนี้

ในขั้นตอนที่ 3 ระบบจะนำลูมิสไลซ์ มาหมุนบิดเกลียว โดยมีจุดศูนย์กลางการหมุนเป็นจุดกึ่งกลางของลูมิสไลซ์ ที่ แล้วจึงนำภาพที่ได้ไปประกอบกับโครงสร้างเส้น Bezier ในขั้นตอนนี้ระบบจะทำให้เกิดการ Translation ภาพตัดขวางไปนั่นเอง ซึ่งสามารถเลือกที่จะหมุนหรือไม่ก็ได้เช่นเดียวกัน ในกระบวนการนี้เราใช้รูปแบบของการทำงาน Matrix Stack ที่มีใน OpenGL ซึ่งเป็นหลักการในการสร้างภาพที่มีความซับซ้อนจากรูปทรงอย่างง่ายหลายๆชิ้น ทำให้สามารถใช้รูปแบบในการวาดภาพตัดขวางปมใหม่อันเดียวกับปมใหม่ที่ต้องการทั้งหมดได้

ขั้นตอนที่เราให้ภาพตัดขวางของเส้นใยเป็นสีขาว โดยสีขาวจะเป็นส่วนที่ใช้แสดงถึงบริเวณที่สะท้อนแสงและสีดำจะเป็นส่วนที่โปร่งแสง สีต่างๆจะถูกนำเข้ามาระบุค่าตามที่ได้อ่านเข้ามาในภายหลัง

ในกระบวนการนี้เราได้ปรับลดวิธีการสร้างเซตข้อมูลต้นแบบของ 2D Lumislice โดยไม่มีการคำนวณแสงและเงาที่มีในขั้นตอนการทำ Blending ฟังก์ชันและเลือกคำนวณค่าสีของปมใหม่จากการประมาณค่าอายุอนุภาคของโครงสร้างควบคุมแทนซึ่งเป็นการทำ index รูปภาพการหมุนบิดเกลียวของปมใหม่โดยเก็บในอะเรย์เพื่อลดการประมวลผล เมื่อต้องการสร้างภาพเส้นใยเราจึงทำเพียงแค่ตรวจสอบว่ามีการหมุนบิดเกลียวหรือไม่ถ้ามีระบบจะไปดึงข้อมูลภาพการบิดเกลียวที่อยู่ในอะเรย์ในลำดับนั้นๆมาจนกว่าจะครบทั้งเส้นใย



รูปที่ 5 แสดงขั้นตอนสร้างภาพเส้นใหม่ที่ทอ โดยที่ (a) แสดงภาพตัดขวางของเส้นใย 1 เส้นใย (b) แสดงการเรียงตัวของ 4 เส้นใยในปมใหม่ 1 เส้น (c) แสดงการบิดเกลียวของเส้นใหม่พรมที่ใช้ทอ

6. การไล่ลวดลายและสีพรม

เมื่อได้โครงสร้างทั้งหมดแล้วก็นำภาพ Bitmap มาตรฐาน 24 bit มาใช้เป็นรูปต้นแบบในการย่อมน โดยวิธีการคืออ่านค่าสีจากภาพ Bitmap เอามาเก็บในโครงสร้างข้อมูลสีในหน่วยความจำ หลังจากนั้นจึงทำการอ่านข้อมูลตำแหน่งของการวาดเส้นใยโดย เปรียบเทียบตำแหน่งเส้นกับตำแหน่งของจุดภาพ แล้วอ่านค่าสีจากจากโครงสร้างข้อมูลสีพรมที่เก็บไว้ โดยโครงสร้างข้อมูลที่ใช้ในการเก็บประกอบด้วยตัวแปร 3 ตัวสำหรับค่าสี โดยวิธีการเทียบค่าสีเป็นดังนี้

$$\text{Color} = \text{O_Color} * \text{Dept_factor}$$

โดยที่

Color	คือ	สีที่ต้องการในตำแหน่งใดๆ
O_Color	คือ	ค่าสีในตำแหน่งเส้นที่ต้องการ ได้มาจากการปรมาณจากภาพพรมต้นแบบ
Depth_factor	คือ	ค่าตัวแปรที่ได้จากการประมาณค่าอายุระหว่างจุดควบคุมเพื่อให้สีในแนวลึกกับเส้นใย

โดยค่าระดับความมืดจะถูกคำนวณจากค่าที่ได้ในการสร้างโครงสร้างเส้นใย เพื่อให้เกิดการไล่ระดับสีในแต่ละชั้นของพรมทำให้เกิดความลึกของภาพจากสีของชั้น โดยมีวิธีการหาดังนี้

$$\text{Step_color} = \text{Color} \times (\text{sx}/\text{step});$$

เมื่อ

Step_color	คือ	ค่าสีในแต่ละชั้นที่ต้องการ
sx	คือ	จำนวนชั้นของสี
step	คือ	จำนวนชั้นที่จะวาดลูมิสไลซ์
Color	คือ	ค่าของสีต้นแบบที่ได้อ่านค่ามาจากเส้นใย

7. การปรับระดับความสูงบนพรม

ขั้นตอนการตัดแต่งระดับความสูงซึ่งเป็นขั้นตอนของการให้ความสูงต่ำบริเวณลวดลายต่างๆซึ่งนำแนวคิดในเทคนิคการสร้างภาพแบบ Displacement mapping มาปรับใช้โดยการอ่านค่าระดับจากไฟล์ข้อมูลที่เก็บค่าระดับของพรม (Height map) โดยข้อมูลที่อ่านมาจะมีลักษณะเป็นภาพ 2 มิติ Gray Scale ซึ่งจะมีค่าสีในแต่ละจุดตั้งแต่ 0 ถึง 255 ระดับนำไปใช้ในการจำกัดความสูงของการวาดโครงสร้างควบคุมของแต่ละเส้นใยที่ต้องทำการตัดแต่งระดับโดยใช้สมการในการหาระดับความสูงของเส้นใยเป็นดังนี้

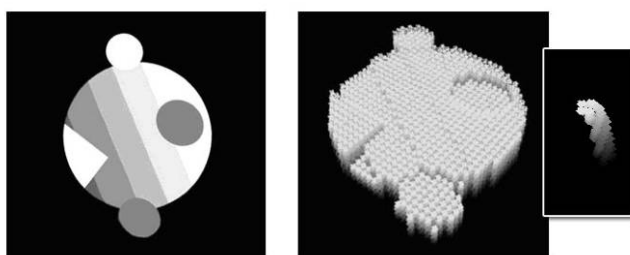
$$CHeight(x, y) = \frac{Rhf \times \max Height}{\max Hf} \quad (5)$$

เมื่อ

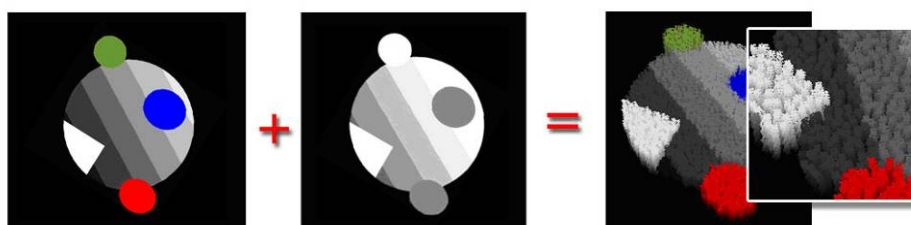
CHeight	คือ	ค่าความสูงที่ต้องการหาของเส้นใย
---------	-----	---------------------------------

$R_{h/f}$	คือ	ค่าที่อ่านได้จากค่าระดับความสูง
$\max Height$	คือ	ค่าสูงสุดของความสูงที่จะทอ
$\max H_f$	คือ	ค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ของค่าภาพระดับ

กระบวนการนี้จะทำไปทุกๆเส้นใยที่จะทำการทอ โดยในการพัฒนาเราได้ทำการเพิ่มเงื่อนไขว่า หากพบจุดสีต่ำสนิท ($RGB = 0$) ระบบจะไม่ทำการทอเส้นใยใดๆ เพื่อให้สามารถสร้างพรมที่มีรูปแบบอิสระได้มากขึ้น



รูปที่ 6 แสดงผลของการตัดแต่งระดับความสูงที่เป็นภาพระดับสีเทา โดยที่ภาพซ้ายเป็นภาพระดับ ส่วนภาพกลางเป็นภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการตัดแต่งระดับความสูงตามภาพซ้ายมือ ภาพเล็กขวาคือเส้นปมใหม่ 1 เส้น



รูปที่ 7 แสดงผลของการตัดแต่งระดับความสูงที่เป็นภาพสี โดยที่ภาพซ้ายเป็นภาพต้นแบบสีพรม ภาพกลางเป็นภาพระดับความสูง และภาพใหญ่ทางขวาเป็นภาพผลการทำงานของโปรแกรมและภาพเล็กขวาเป็นภาพขยายผล

8. การทดสอบพรม

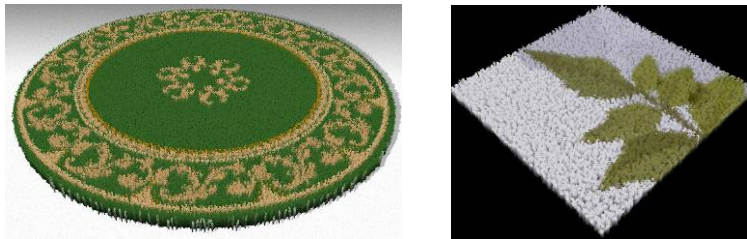
การทดสอบระบบการจำลองภาพพรมมีดังต่อไปนี้

- 8.1 การทดสอบว่าระบบสามารถรองรับพรมในลักษณะลายเล็กและลายใหญ่ได้หรือไม่และผลเป็นอย่างไร โดยลายใหญ่หมายถึงลายพรมที่เป็นรูปกราฟฟิกที่ไม่มีจุดเล็กๆที่มีรายละเอียดน้อยๆ ในจุดนั้นๆ และลายเล็กหมายถึงลวดลายที่มีรายละเอียดเล็กๆอยู่เป็นจำนวนมากเช่นพรมที่เป็นลายดอกไม้เล็กๆตามขอบพรม
- 8.2 การทดสอบการตัดแต่งระดับความสูงของเส้นใย
- 8.3 การทดสอบว่าสามารถแสดงสีได้จากการผสม 3 สีหลักได้หรือไม่อย่างไร
- 8.4 การทดสอบว่าระบบรองรับจำนวนเส้นใยได้สูงสุดเท่าไรและให้ผลเป็นอย่างไร
- 8.5 การทดสอบระยะเวลาในการสร้างภาพ

8.6 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นใยกับขนาดลูมิสไลซ์ ที่มีผลต่อภาพในการทดลองครั้งนี้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ PC โดยมีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) Intel Celeron D 2.4 GHz Ram 512 VGA onboard S3 Prosavage DDR Share Video Memory กับ Ram

ผลการวิจัย

1. ผลการทดสอบพรมลายเล็กและลายใหญ่ ปรากฏว่าระบบสามารถจำลองพรมได้ทั้ง 2 ชนิดตามที่แสดงในรูปที่ 8 แต่ในกรณีพรมลายเล็กนั้นจำเป็นต้องใช้ความหนาแน่นของเส้นใยมากกว่าพรมลายใหญ่เพื่อให้ได้ผลที่ดี
2. ผลการทดสอบการตัดแต่งระดับความสูงของเส้นใยปรากฏว่าระบบสามารถทำการตัดแต่งระดับความสูงได้ตามข้อมูลระดับความสูงต้นแบบดังรูปที่ 9 โดยจะสามารถสังเกตเห็นในภาพจำลองว่ามีร่องระหว่างลาย หรือสีบริเวณขอบลายพรมที่แตกต่างจากตรงบริเวณที่ไม่มีการตัดระดับ
3. ผลการทดสอบการให้สี พบว่าระบบสามารถแสดงภาพสีได้ตามที่ได้ออกแบบไว้โดยค่าสีที่สามารถแสดงได้คือ 16.7 ล้านสี



รูปที่ 8 ภาพซ้ายแสดงพรมในแบบลายเล็ก ภาพขวาแสดงพรมโดยในแบบลายใหญ่

4. ผลการทดสอบการรองรับจำนวนเส้นใยสูงสุดจากการทดลองตามตารางที่ 1 พบว่าระบบสามารถจำลองภาพไปได้ถึงระดับความหนาแน่นสูงสุด 400 × 400 เส้นในเครื่องทดสอบ ในกรณีเส้นใยต่อด้าน 800 เส้นระบบจะทำงานช้าลงมาก เป็นเหตุให้ระบบไม่เหมาะต่อการหมุนมุมมองภาพในลักษณะต่างๆ อย่างไรก็ตามก็ตีระบบได้ถูกออกแบบไว้รองรับการทำงานถึง 1000 × 1000 เส้น ซึ่งการทดสอบการทำงานพบว่าระบบสามารถทำงานได้ถึง 800 เส้นต่อด้านในเครื่องที่มีระดับความเร็วสูงกว่าระบบทดสอบ
5. ผลการทดสอบระยะเวลาในการทำงาน ทำโดยการเก็บเวลาก่อนการทำการจำลองและเมื่อภาพถูกวาดจนสมบูรณ์ก็จะทำการบันทึกเวลาอีกครั้งหนึ่ง ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่าระบบจะใช้เวลามากขึ้นหลายเท่าตัวเมื่อมีการเพิ่มความหนาแน่นในแต่ละด้าน เช่นความหนาแน่นต่อด้านจาก 100 เส้นเป็น 400 เส้นจะใช้เวลามากขึ้น 9.26 เท่า



รูปที่ 9 แสดงผลการเปรียบเทียบภาพพรม (ซ้าย) ภาพจำลองพรมแต่งระดับความสูง (ขวา) ภาพถ่ายพรมจริง

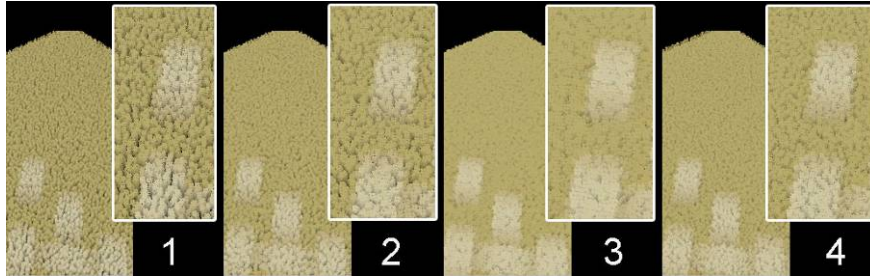
ความหนาแน่น		เวลาในการ
ต่อต้าน	ทั้งหมด	สร้างภาพ(วินาที)
<50	<2500	0.65
50	2500	0.65
80	6400	1.2
100	10000	1.63
150	22500	3.45
200	40000	5.03
300	90000	8.78
400	160000	15.11
800	640000	59.75

ตารางที่ 1 ความเร็วในการทำงานของระบบการจำลองภาพ

6. ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นใยกับขนาดลูมิสไลซ์ ที่มีผลต่อภาพพรมจำลอง โดยทำการทดลองปรับค่าทั้งสองจำนวน 4 ครั้ง ตามตารางที่ 2 ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 16 จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้พรมดูสมจริงและสวยงามมากขึ้น และค่าขนาดลูมิสไลซ์ ควรมีขนาดเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมจึงจะได้ภาพที่สมจริงด้วยดังเช่นภาพในรูปที่ 10(4) ในขณะที่รูปที่ 10(2) และรูปที่ 10(3) มีการปรับขนาดลูมิสไลซ์ให้ใหญ่ขึ้นเพื่อลดช่องว่างระหว่างเส้นใยนั้นจะทำให้ภาพพรมดูบวมผิดปกติ

ครั้งที่	ความหนาแน่น	ขนาดลูมิสไลซ์
1	200	0.025
2	200	0.030
3	200	0.040
4	280	0.025

ตารางที่ 2 ค่าความหนาแน่นและขนาดลูมิสไลซ์ ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 10 แสดงการจำลองภาพที่รายละเอียดต่าง ๆ กัน โดยที่พรมชิ้นนี้จะมีค่าต่างๆ ในการปรับตั้งนี้

บทวิจารณ์

ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบจำลองภาพพรม ระบบจำลองภาพพรมสามารถทำงานได้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไป เนื่องจากใช้คำสั่งมาตรฐาน OpenGL และใช้ Format ภาพ Bitmap บน Windows ซึ่งเป็นรูปแบบภาพมาตรฐาน ระดับความเร็วในการสร้างโมเดลและสร้างภาพนั้นแปรผันตามความเร็ว CPU และการ์ดจอ เหตุผลหลักที่ทำให้การสร้างภาพไม่สามารถทำงานได้ในระดับเวลาจริงแม้ว่าจะพยายามลดขั้นตอนการทำ Translation ในเส้นใยแล้วก็ตาม เป็นเพราะว่ามีการวาด Polygon จำนวนมากและมีการผสมสีของลูมิสไลซ์ ในแต่ละชั้นของลูมิสไลซ์ ในทุกๆปมใหม่ที่วาดในทุกรอบการทำงาน

ในการจะเพิ่มคุณภาพของภาพให้สมจริงมากขึ้นนั้นจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลายๆส่วนด้วยกัน ในงานชิ้นนี้เน้นการสร้างโครงสร้างความคมและรูปแบบของการสร้างภาพตัดขวางซึ่งเป็นตัวแทนของไหมพรมนับเป็นปัจจัยสำคัญอันดับแรกในการที่จะทำให้ภาพออกมาดูสมจริง เรื่องของการคำนวณแสง การจำลองอนุภาคในลักษณะอื่นๆที่จะเพิ่มคุณภาพของภาพได้ รวมไปถึงขั้นตอนการสร้างภาพระดับความสูง และ Dynamic ของระบบ

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เราได้พยายามที่จะสร้างโมเดลสำหรับการสร้างภาพพรมในลักษณะสามมิติเพื่อให้สามารถเห็นตัวอย่างของพรมก่อนมีการผลิตจริง โมเดลได้ถูกออกแบบมาเพื่อทำงานกับภาพในลักษณะของพรม ในโครงสร้างของการทำจึงมองในเรื่องของรูปแบบการนำข้อมูลที่มีอยู่เช่นภาพลวดลาย ความหนาแน่นของไหมพรม สีพรม มาใช้งานซึ่งเป็นการนำเทคนิค Displacement, Particle System และลูมิสไลซ์ เป็นแนวคิดในการสร้างแบบจำลองนี้ โดยตัวควบคุม ลักษณะส่วนใหญ่ก็พยายามจำลองให้มีความใกล้เคียงกระบวนการผลิตชิ้นงานจริง และในส่วนการจำลองนั้นมุ่งเน้นในเรื่องของอิสระในการปรับแต่งและการปรับให้ระบบมีความง่ายขึ้นสำหรับการนำไปพัฒนาขึ้นใช้งาน และการนำเอาเทคโนโลยีกราฟฟิกในปัจจุบันมาใช้งานในงานทางอุตสาหกรรม โมเดลต้นแบบระบบการจำลองภาพพรมนั้นสามารถทำงานได้ แต่หากจะมีการนำไปใช้งานนั้นต้องมีการขยายขีดความสามารถของระบบขึ้นในส่วนของการ

รองรับเส้นใยที่สูงขึ้น นอกจากนี้ระดับความเร็วในการสร้างภาพนั้นยังไม่รวดเร็วเท่าที่ควรจะเป็นอันเนื่องมาจากระบบมีการผสมสีเส้นใยที่ต้องทำงานในทุกกรอบและทุกชั้นของเส้นใยซึ่งส่งผลให้ความเร็วโดยรวมลดลง ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการหาค่าระดับสีก่อนในขั้นตอนการสร้างข้อมูล เพื่อลดการทำงานในแต่รอบการทำงาน

ข้อเสนอแนะ

สำหรับหัวข้อที่สามารถนำไปพัฒนาต่อนั้นมีอยู่หลายส่วนด้วยกัน ในส่วนของการสร้างลูมิสไลซ์ให้มีรูปแบบเปลี่ยนแปลงไปตามแสงที่ส่องเข้ามาซึ่งจะมีผลต่อการมองเห็นรูปแบบการ สร้างอนุภาค ให้เป็นตามลวดลายของพรม ซึ่งอาจจะให้ผลการจำลองภาพที่สมจริงมากขึ้น การทำในส่วนที่เป็น Dynamic ของโครงสร้างเส้นใยซึ่งจะใช้ในการทำภาพเคลื่อนไหว (Animation) การทำระบบช่วยสร้างขอบของลายที่มีการตัดให้เกิดเป็นร่องให้มีความสมจริงและตรงกับการใช้งานมากขึ้น การปรับระดับความเร็วโดยมุ่งเน้นเรื่องของระดับของรายละเอียด (level of detail) และการทำ noise ให้กับภาพต้นแบบเพื่อทำให้เกิดลักษณะเหมือนกับค่าสีที่แตกต่างกันในแต่ละบริเวณของพรมเพื่อให้มีความสมจริงมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Anjyo, Ken-Ichi, Yoshiaki Usami and Tsuneya Kurihara. 1992. A Simple Method for Extracting the Natural Beauty of Hair. **Computer Graphics (SIGGRAPH 92 Conference Proceedings)**. volume 26: 111-120
- Bezier, P. 1974. **Mathematical and Practical Possibilities of UNISURF**. Academic Press, New York.
- Dan B Goldman. 1996. Fake Fur Rendering. **Source International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques archive Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques table of contents: 127–134.**
- Donald H. and M. Pauline B. 1996. **Computer Graphic Second Edition**. Prentice Hall international, inc.
- Foley, V. Dam, Feiner, Hughes. 1990. **Computer Graphics Principle and Practice, Second Edition**, Addison-Wesley
- Gary S. 2004. **Real-time Rendering of Fur. Honors Thesis**, University of Sheffield.
- Lengyel, J. Praun, E. Finkelstein, A Hoppe, H. 2001. Real Time Fur over Arbitrary Surfaces. **Source Symposium on Interactive 3D Graphics archive Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics table of contents: 227–232.**
- Michael A. Kowalski Lee Markosian, J.D. Northrup, Lubomir Bourdev, Ronen Barzel, Loring S. Holden, John F. Hughes. 1999. Art-Based Rendering of Fur, Grass, and Trees. **Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques.** 433 - 438
- Miller, Gavin S.P. 1988. From Wire-Frame to Furry Animals. **Graphics Interface' 88 Proceedings:138-145.**

- Tae-Yong Kim Ulrich Neumann. 2000. A Thin Shell Volume for Modeling Human Hair. **Computer Animation 2000(CA'00)**: 104-2000.
- Reeves, W. T. 1983. Particle Systems - A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects. **Siggraph 83**, 17(3) pp 359-376.
- Rosenblum, Robert E, Wayne E, Carlson, and Edwin Tripp. 1991. "Simulating the Structure and Dynamics of Human Hair: Modeling, Rendering, and Animation", **The Journal of Visualization and Computer Animation**, 2: 141-148.
- Yanyun Chen, Stephen Lin, Hua Zhong, Ying-Qing Xu, Baining Guo, and Heung-Yeung Shum. 2003. Realistic Rendering and Animation of Knitwear: **IEEE Visualization and Computer Graphics**. 9(1): 359-368.