

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก โครงการสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ(Research Center for Communications and Information Technology : ReCCIT) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2551 วงเงินงบประมาณ 106,099 บาท



RCH

QA

76.9

v5

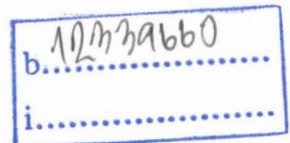
961767

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....

120178

วัน, เดือน, ปี..... 9 ก.พ. 2555



บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการจำลองแรงแบบมีปฏิสัมพันธ์ด้วยอุปกรณ์วีอาร์สำหรับวัตถุที่แตกหักได้และการประยุกต์ใช้ในการฝึกฝนทางการแพทย์ โดยอาศัยอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส โมเดลของการจำลองการแตกหักของหินปูนพัฒนามาจากข้อกำหนดของวัตถุที่มีความแข็ง ซึ่งประกอบด้วยจุดมวลซึ่งเชื่อมต่อกันด้วย ข้อกำหนดแบบแข็ง เส้นเพื่อรักษาระยะห่างให้คงเดิม แทนโครงสร้างทางกายภาพของวัตถุเสมือน อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก และถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการสร้างภาพกราฟิก ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างการเชื่อมต่อของจุดมวลเพื่อให้สามารถใช้ในการจำลองแรงแบบมีปฏิสัมพันธ์ได้ นอกจากนี้เพื่อให้สามารถใช้งานได้กับการประมวลผลแบบทันที งานวิจัยนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมในการคำนวณโดยอาศัยวิธีการต่าง ๆ ที่พัฒนาขึ้น อันประกอบไปด้วยการจำกัดขอบเขตการกระจายของแรง เพื่อลดเวลาการคำนวณลงจากเดิมที่ต้องคำนวณทั้งชิ้นของวัตถุ การทำนายตำแหน่งล่วงหน้าของอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส เพื่อจัดเตรียมเมตริกซ์การกระจายแรงก่อนที่จะสัมผัสกับวัตถุเสมือนจริง ๆ หลังจากนั้นจะนำวิธีการข้างต้นมาพัฒนาเป็น โปรแกรมการจำลองการชูดหินปูนทางทันตกรรม เพื่อเป็นการฝึกฝนทักษะให้แก่นักศึกษาทันตแพทย์ก่อนจะไปปฏิบัติงานจริง

Abstract

This research project is Force-Feedback Simulation Using VR Devices for Brittle Objects with Applications in Medical Training. The virtual plaque is created by the rigid-constraint model, represented as a set of point-masses connected by distance-preserving linear constraints. The drawbacks of the original method are that it takes much calculation time and is designed for graphic generation. To use the method for real-time haptic simulation, computational efficient algorithms are developed. Bounded force propagation method was developed to limit region of force propagation and reduce calculation time. Position Prediction technique was developed to predict the force feedback device end-point position. This allows time for preparing the appropriate constraints matrix before actual collision occurs. The methods developed were used to implement a plaque removal application for training the dentist students.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย	2
1.5 สภาพแวดล้อมในการดำเนินงานวิจัย	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การศึกษาการกระจายของแรงภายในวัตถุและการจำลองการแตกหัก	4
บทที่ 3 โมเดลการจำลองการแตกหัก	
3.1 โครงสร้างของวัตถุที่แตกหักได้	9
3.2 การจำลองการแตกหัก	10
3.2.1 การจำกัดขอบเขตการกระจายของแรง (Bounded Force Propagation)	12
3.2.2 การทำนายตำแหน่งล่วงหน้าของอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส (Position Prediction)	14
3.3 การโมเดลของพื้น เหยือก และหินปูน	14
3.3.1 การสร้างโมเดลพื้นและเหยือก	15
3.3.2 การสร้างโมเดลหินปูน	15

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4 การจำลองการชูดหินปูน	16
3.4.1 การจำลองแรง	16
3.4.1.1 แรงกดจากมือผู้ใช้	16
3.4.1.2 แรงสั่น	17
3.4.2 การจำลองการแตก	18
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัยและพัฒนา	
บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัยและพัฒนา	
7.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ	44
7.2 ข้อเสนอแนะ	44
บรรณานุกรม	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้ถูกนำมาใช้งานในด้านการฝึกฝนทักษะและการเรียนรู้ในหลายสาขาวิชา อย่างไรก็ตามการฝึกฝนทักษะบางด้านจำเป็นต้องติดต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยอาศัยผัสสะหลายช่องทาง (multimodal sensory) นอกเหนือไปจากขีดความสามารถของอุปกรณ์ I/O มาตรฐานโดยทั่วไป อุปกรณ์จำลองสภาพเสมือนจริง (Virtual Reality Devices) หรือ วีอาร์ (VR) เป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มช่องทางในการสื่อสารระหว่างผู้ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ ทำให้เป็นประโยชน์ต่อการนำคอมพิวเตอร์มาใช้งานในลักษณะข้างต้น โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีวีอาร์ในด้านการจำลองแรงแบบมีปฏิสัมพันธ์โดยอาศัยอุปกรณ์วีอาร์ที่เรียกว่า Force-feedback Device ในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการจำลองแรงที่เกิดจากกระทบกันระหว่างวัตถุที่เป็นเครื่องมือ (เช่น อุปกรณ์การแพทย์ หรือเครื่องมือช่าง) กับวัตถุที่แตกหักได้ (เช่น กระดูก ฟัน หินปูน เป็นต้น) โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการประมวลผล และผลตอบแทนที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับการสัมผัสวัตถุจริง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะได้พิจารณาในกรณีของวัตถุที่สัมผัสเป็นส่วนของหินปูนที่เกิดในช่องปาก เทคนิคที่ได้จะนำไปใช้ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเพื่อการฝึกฝนทักษะทางทันตกรรม ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายสิ้นเปลือง การใช้อุปกรณ์จริงที่มีราคาแพง ตลอดจนทำให้สามารถทำการฝึกฝนกับปัญหาในลักษณะที่แตกต่างกันได้ ซึ่งทำได้ยากหรือไม่อาจกระทำได้กับการฝึกฝนกับแบบจำลอง (Model) หรือกับคนจริง ๆ

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาเทคนิคการจำลองแรงที่เกิดจากกระทบกันระหว่างวัตถุที่เป็นเครื่องมือ (เช่น อุปกรณ์การแพทย์ หรือเครื่องมือช่าง) กับวัตถุที่แตกหักได้ (เช่น กระดูก ฟัน หินปูน เป็นต้น) โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการประมวลผล
2. เพื่อพัฒนาโปรแกรมและระบบช่วยฝึกฝนทักษะทางทันตกรรม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. การพัฒนาเทคนิคการจำลองทางกายภาพสำหรับวัตถุที่แตกหักได้ อาศัยอุปกรณ์ตอบสนองแรงที่มีจุดสัมผัส 1 จุด และมี Degrees of Freedom เท่ากับ 3 โดยการเพิ่มจุดสัมผัสอาศัยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์
2. การจำลองและฝึกฝนออกแบบสำหรับการใช้มือข้างเดียว

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับ การสร้างโมเดลวัตถุที่มีความแข็งแรงแต่สามารถแตกหักได้ เพื่อนำไปสร้างหุ่นปูน
2. ศึกษาทฤษฎีการกระจายของแรง ในวัตถุที่มีความแข็งแรง
3. วิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างข้อมูล
4. สร้างสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กำหนดคุณสมบัติของวัตถุให้ใกล้เคียงกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์
5. พัฒนาโปรแกรม
6. ทดสอบโปรแกรม
7. สรุปผลและจัดทำเอกสารประกอบโครงการ

1.5 สภาพแวดล้อมในการดำเนินงานวิจัย

สภาพแวดล้อมหมายถึงรวมถึงอุปกรณ์ ระบบปฏิบัติการ ที่ใช้ในการพัฒนา และการดำเนินโครงการ ซึ่งประกอบไปด้วย

1. Microsoft Windows XP
2. อุปกรณ์ที่ให้ความรู้สึกได้โดยแรงสัมผัส PHANToM Premium 1.0 with Encoder Finger stylus
3. ใช้ Microsoft Visual C++ เป็น compiler
4. ใช้ OpenGL ร่วมกับซอฟต์แวร์ออกแบบวัตถุ 3 มิติ ในการสร้างโมเดลของฟัน เหงือก และหินปูน
5. ใช้ Haptic library เพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์จำลองแรงสัมผัสเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาและตีพิมพ์เผยแพร่องค์ความรู้พื้นฐานด้านการจำลองกายภาพโดยอาศัยเทคโนโลยีวีอาร์
2. เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาโปรแกรมและระบบคอมพิวเตอร์ซึ่งอาศัยเทคนิคด้านสื่อประสมและวีอาร์ สำหรับการใช้งานด้าน Computer-aided Design and Training
3. เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาในระดับปริญญาโทของนักศึกษาในสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ



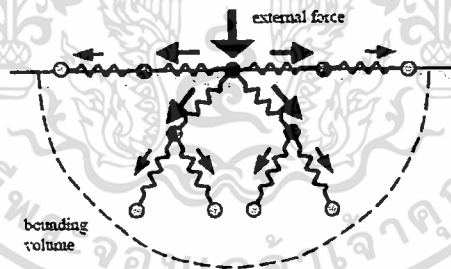
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การศึกษาการกระจายของแรงภายในวัตถุและการจำลองการแตกหัก

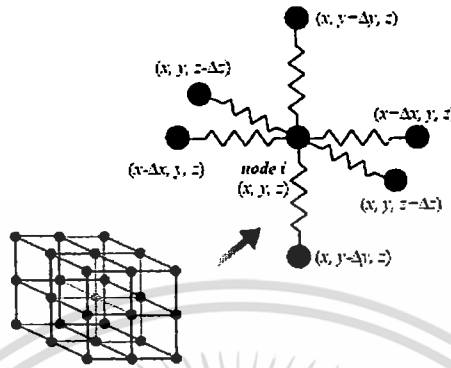
K.S. Choi และคณะ[1] ได้อธิบายถึงการจำลองการโมเดลวัตถุที่มีความยืดหยุ่น โดยใช้แมสสปริงโมเดล และวิธีการกระจายแรงเมื่อมีแรงภายนอกกระทำที่โหนดใด ๆ ไปยังโหนดต่าง ๆ โดยกำหนดจำนวนชั้นการกระจายของแรงที่จำกัด เพื่อลดเวลาในการคำนวณ แรงที่เกิดขึ้นในแต่ละโหนดประกอบไปด้วย แรงภายนอก, แรงสปริงที่เชื่อมต่อกับโหนดใกล้เคียง และแรงหน่วงที่เกิดจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของสปริง (damping force) และแรงที่เกิดจากความเร่งของวัตถุนั้น การใช้แมสสปริงโมเดล เป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และการกำหนดจำนวนชั้นการกระจายของแรง เป็นวิธีลดการคำนวณทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของโปรแกรมดีขึ้น ซึ่งเหมาะกับงานประเภท real time เช่น การจำลองวัตถุที่มีความยืดหยุ่นบน Web, การจำลองการการผ่าตัดเพื่อฝึกฝนนักศึกษาแพทย์ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 การกระจายแรงโดยใช้แมสสปริง โมเดล

- สมการของแรงที่กระทำต่อระบบ

สำหรับวัตถุที่มีปริมาตรที่ถูกแบ่งเป็น โหนดและเชื่อมต่อกันด้วยสปริง แต่ละสปริงจะเป็นไปตามกฎ Hook's Law และการเคลื่อนที่ของแต่ละโหนดจะถูกหน่วงด้วย damping force ที่มีสัดส่วนตามความเร็วของแต่ละโหนด



รูปที่ 2.2 การจำลองวัตถุที่มีความยืดหยุ่นด้วย mass-spring model

จากรูปที่ 2.2 โหนด i ถูกเชื่อมต่อด้วยสปริงกับโหนดใกล้เคียงอีก 6 โหนด แรงทั้งหมดที่กระทำกับโหนด i เป็นผลมาจากแรงจากโหนดใกล้เคียงเหล่านี้ และแรงภายนอก F_i , พฤติกรรมของโหนด i จะเป็นตามกฎการเคลื่อนที่ของ Newton

$$m_i \frac{d^2 u_i}{dt^2} + d_i \frac{du_i}{dt} + \sum_{j \in \text{connected nodes}} \frac{k_{ij} (|r_{ij}| - l_{ij})}{|r_{ij}|} r_{ij} = F_i \quad (2.1)$$

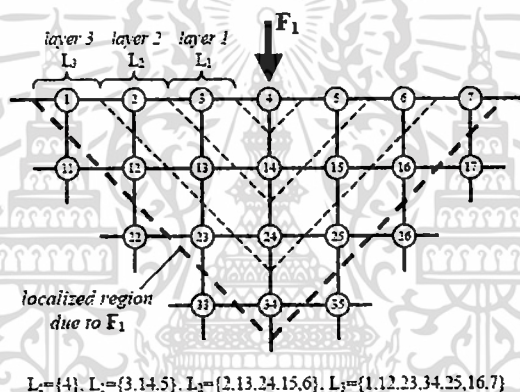
จากสมการข้างบน m_i , u_i และ d_i เป็นค่าของ มวล, ตำแหน่ง และ ค่า damping constant ของโหนด i และ $r_{ij} = u_j - u_i$ เป็นเวกเตอร์จากโหนด i ไปยังโหนด j , l_{ij} เป็นค่าความยาวของสปริงในสภาวะปกติ (Natural length) ส่วน u_i จะใช้ในแก้สมการ differential equation โดยใช้วิธีการ finite difference method คือ ให้ Δt เป็นเวลาในแต่ละ time step, ตำแหน่งของโหนด i ที่เวลา $t + \Delta t$ คือ $u_i(t + \Delta t)$ ซึ่งจะถูกราคำนวณโดยใช้ตำแหน่งในเวลาปัจจุบัน $u_i(t)$ และตำแหน่งในช่วงเวลาที่ผ่านมา $u_i(t - \Delta t)$

$$\frac{du}{dt} \approx \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{u(t + \Delta t) - u(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (2.2)$$

$$\frac{d^2 u}{dt^2} \approx \frac{\Delta^2 u}{\Delta t^2} = \frac{u(t + \Delta t) - 2u(t) + u(t - \Delta t)}{(\Delta t)^2} \quad (2.3)$$

- การกำหนดขอบเขตกระจายของแรง

จากรูปที่ 2.3 แสดงอาร์เรย์ของโหนดใน 2 มิติ เมื่อ โหนด 4 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงภายนอก F_1 มากระทำ โหนด 4 จะเปลี่ยนตำแหน่งไปจากผลของแรง F_1 และแรงจากสปริงของโหนดใกล้เคียง (คือ 3, 4 และ 5 ในเลเยอร์ที่ 1 (layer 1)) และกระบวนการนี้จะถูกทำซ้ำสำหรับทุก ๆ โหนดในเลเยอร์ที่ 1 ตัวอย่างเช่น โหนด 3 จะเปลี่ยนตำแหน่งโดยแรงจากสปริงที่โหนด 2, 13 และ 4 และถ้าโหนดในเลเยอร์ที่ 1 เชื่อมต่อกับโหนดอื่น ๆ ในเลเยอร์ที่ 2 จะส่งผลให้โหนดเหล่านั้นมีการเปลี่ยนตำแหน่งด้วย (โหนด 2, 13, 24, 15 และ 6) และจากโหนด 4 ที่ส่งไปยังโหนดอื่นในเลเยอร์ที่มากขึ้น จะถูกลดทอนลงเนื่องจากสปริง และแรงเหล่านี้จะถูกกระจายไปยังทุก ๆ โหนดของวัตถุใน 1 time step



รูปที่ 2.3 การกระจายของแรงใน 2 มิติ ที่ความลึกเท่ากับ

สำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบไม่มาก โหนดที่อยู่ไกลมาก ๆ เราสามารถไม่สนใจได้ “penetration depth” เป็นวิธีจำกัดจำนวน เลขอร์ของโหนดที่จะถูกกระจายแรงไป จำนวนโหนดที่ถูกกระจายแรงไป (affected nodes) เป็นไปตามสมการที่ 1.4

$$N = \frac{1}{3}(n+1)(2n^2 + 4n + 3) \quad (2.4)$$

โดย n คือจำนวนเลเยอร์ ดังนั้นเราสามารถควบคุมความซับซ้อนของการคำนวณได้โดยการควบคุมค่า n

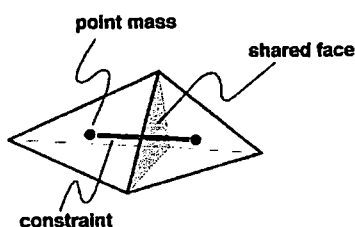
James F., O'Brien, Jessica K. และ Hodgins[2] ได้นำเสนอเทคนิคการจำลองวัตถุที่มีความยืดหยุ่น รวมทั้งการ โมเดลการแตกหักและการกระจายเส้นทางการแตกกับวัตถุ 3 มิติที่มีปริมาตรเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) วิเคราะห์ความเค้นภายในวัตถุเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ ในการจำลองนี้จะกำหนดจุดเริ่มต้นของการแตกที่เหมาะสมและทิศทางของการแตกที่ควรกระจายไป จากผลการทดลองโดยใช้วัตถุที่มีจำนวนโหนดเท่ากับ 338 โหนด 1109 เอลิเมนต์ พบว่าเวลาที่ใช้ในการจำลองการแตกหักนี้มีค่าเท่ากับ 339 วินาที ซึ่งเป็นเวลานานและไม่เหมาะกับงานแบบ real time เป็นอย่างยิ่ง



รูปที่ 2.4 พื้นผิวของวัตถุ : a พื้นผิวเริ่มต้นของวัตถุ; b พื้นผิวเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ; c เหมือน b แต่มีแรงมากขึ้น d: การแตกภายในวัตถุ แสดงเป็น wire frame

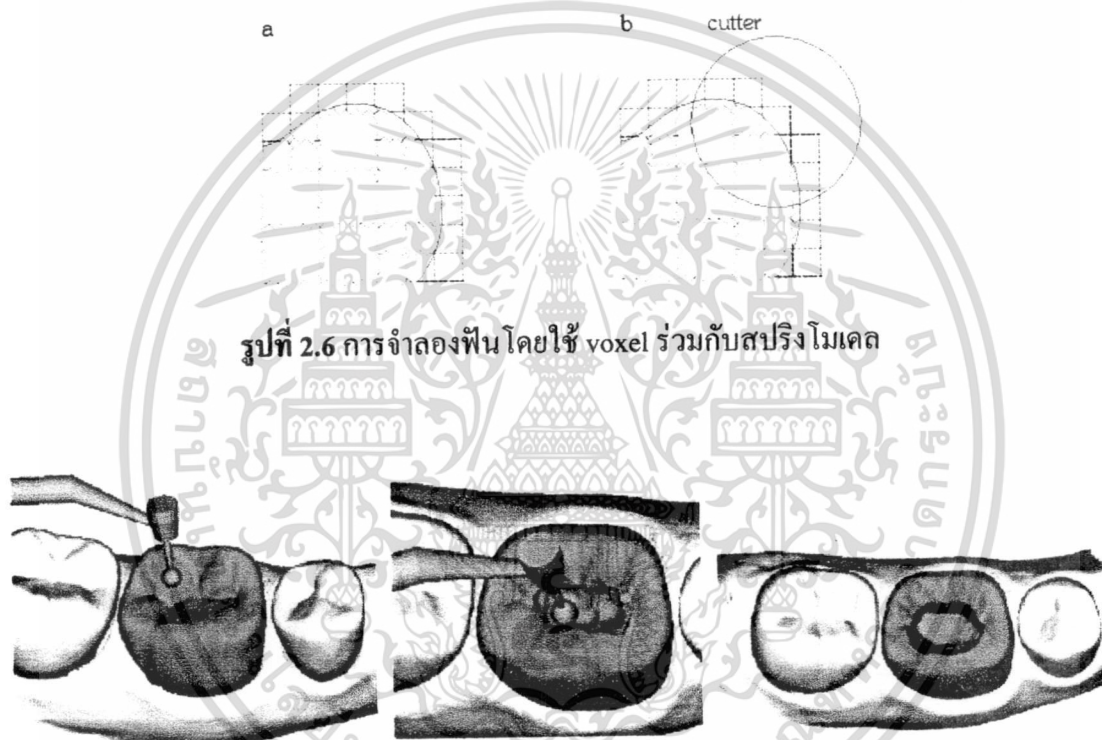
J. Smith, A. Witkin และ D. Baraff [3] ได้นำเสนอเทคนิคสำหรับการจำลองการแตกหักของวัตถุที่มีความแข็งแต่เปราะ โดยวัตถุจะประกอบไปด้วยรูปทรง tetrahedra ชิ้นเล็กๆ ต่อกันเป็นรูปทรง และตรงกลางของ tetrahedral จะถูกแทนด้วยจุดมวล เชื่อมต่อกันด้วย distance-preserving linear constraints แทนการเชื่อมต่อแบบสปริง ข้อกำหนดของวัสดุที่มีความแข็ง คือ แต่ละจุดบนวัสดุที่มีความแข็งจะรักษาระยะห่างระหว่างจุดให้คงที่เสมอ เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ การใช้ข้อกำหนดนี้แทนการปรับค่าความแข็งของสปริง ทำให้ลดเวลาในการคำนวณ พร้อมทั้งสามารถควบคุมคุณสมบัติของการแตกของวัตถุได้ และใช้วิธีการของ Lagrange multipliers สำหรับการคำนวณการกระจายของแรงไปยังจุดมวลต่าง ๆ และเมื่อผลลัพธ์ของแรงที่กระจายไปมากกว่าค่าแรงยึดเกาะระหว่างกันจะทำให้เกิดการแตกหักขึ้น



รูปที่ 2.5 ลักษณะการเชื่อมต่อของจุดมวลระหว่าง 2 tetrahedra

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

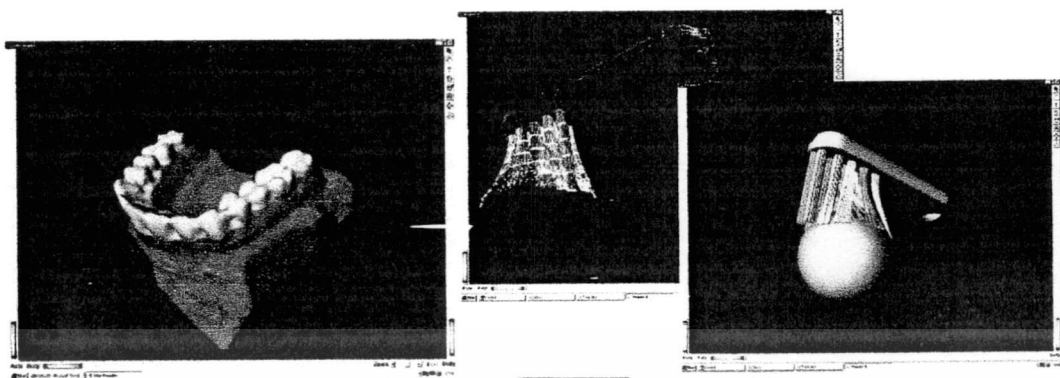
H. T. Yau และคณะ[4] นำเสนอการจำลองการฝึกหัดการกรอฟันร่วมกับอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส โดยฟันจะถูกสร้างจาก voxel เล็ก ๆ ประกอบขึ้นมาเป็นตัวฟัน แต่ละขอบของ voxel จะถูกแทนด้วยสปริงดังรูปที่ 2.6a เมื่ออุปกรณ์กรอฟันสัมผัสกับฟัน (แทนด้วยวงกลม) แรงที่ส่งกลับมายังผู้ใช้จะเท่ากับผลรวมของแรงสปริงทั้งหมดที่ intersect กับอุปกรณ์กรอฟัน ดังรูปที่ 2.6b และเมื่อแรงต้านนี้สูงพอถึงค่า ๆ หนึ่ง จะนำ voxel บริเวณที่ intersect นี้ออกไป งานวิจัยนี้ไม่ได้ใช้การคิดวิธีการกระจายของแรงภายในวัตถุเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ จึงไม่เหมาะกับการจำลองการแตกหัก นอกจากนี้ voxel มีจำนวนมากเท่าไร จะทำให้ใช้เวลาการคำนวณมากขึ้นเท่านั้น



รูปที่ 2.6 การจำลองฟันโดยใช้ voxel ร่วมกับสปริงโมเดล

รูปที่ 2.7 การกรอฟันเมื่อใช้อุปกรณ์กรอฟันเสมือน

H. T. Yau และคณะ[5] สร้างโปรแกรมจำลองการแปลงฟันด้วยอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส โดยขนแปรงถูกออกแบบโดยใช้สปริงโมเดล แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โปรแกรมการจำลองการแปลงฟัน ร่วมกับอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

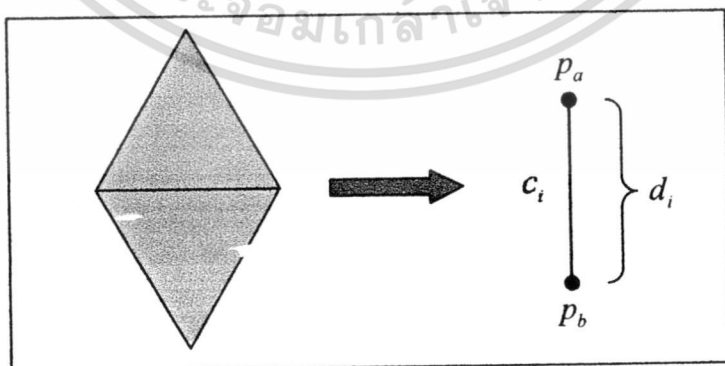
บทที่ 3

โมเดลการจำลองการแตกหัก

การจำลองการแตกหักนั้นได้ปรับปรุงวิธีการใน [3] เพราะวิธีการเดิมที่ใช้นั้น เป็นการนำไปใช้กับงานกราฟิกเท่านั้นโดยไม่มีการใช้อุปกรณ์จำลองแรงสัมผัสร่วมด้วย และการประมวลผลเป็นแบบ off-line และแรงที่กระทำต่อวัตถุให้มีการแตกหักเป็นแรงที่เกิดจากการโยนลูกเหล็กใส่วัตถุ ดังนั้นเราจึงพัฒนาและปรับปรุงวิธีการเดิมให้สามารถตอบสนองแบบ real-time และสามารถใช้แรงจากมือของผู้ใช้ผ่านทางอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัสในการทำให้วัตถุเกิดการแตกหัก โดยการปรับปรุงโครงสร้างของวัตถุให้มีความซับซ้อนน้อยลง นอกจากนี้ยังต้องปรับปรุงอัลกอริทึมให้ใช้เวลาในการคำนวณน้อยลง ด้วยวิธี Bounded Force Propagation การทำ Position Prediction และปรับปรุงอัลกอริทึมการตรวจสอบการชนกันระหว่างอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัสกับวัตถุเสมือน เพื่อเพิ่มความเร็วและเพิ่มประสิทธิภาพให้มากขึ้น ซึ่งวิธีการข้างต้น จะได้กล่าวต่อไป

3.1 โครงสร้างของวัตถุที่แตกหักได้

วัตถุที่สามารถแตกหักได้ ถูกสร้างจากโพลีกอนสามเหลี่ยมขึ้นเล็ก ๆ เชื่อมต่อกันเป็นวัตถุชิ้นใหญ่ โดยแต่ละชิ้นของโพลีกอนจะถูกแทนด้วยจุดมวล (point-mass) ซึ่งถูกวางไว้ที่ตรงกลางของชิ้นโพลีกอน จุดมวลเหล่านี้จะถูกเชื่อมต่อกันด้วยตัวยึด (bond) เรียกว่า "Rigid-constraint" ซึ่งเป็นข้อกำหนดหรือตัวบังคับให้วัตถุมีสภาพทรงรูปเป็นของแข็ง ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของวัตถุที่แตกหักได้

p_a และ p_b เป็นตำแหน่งของจุดมวลที่เชื่อมต่อกับ constraint ที่ i และ d_i คือขนาดความยาวของ constraint ส่วน c_i คือ rigid-constraint ค่ามวลของแต่ละจุดมวลถูกกำหนดโดยพื้นที่แต่ละชิ้นของโพลีกอนนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิกอนและค่าความหนาแน่นของโพลีคอนของวัตถุ ซึ่งทำให้เราสามารถควบคุมคุณสมบัติของวัตถุได้ ส่วนค่าของแรงยึดเกาะ (bond's strength) ระหว่างกันของแต่ละชั้นของโพลีคอนนั้นก็จะมีค่าแตกต่างกัน โดยอาศัยฟังก์ชันการสุ่มของ noise and turbulence function [10] ซึ่งค่าแรงยึดเกาะนี้จะเป็นตัวชี้ว่าส่วนไหนของวัตถุจะแตก เมื่อมีแรงมากระทำ

3.2 การจำลองการแตกหัก

จากรูปที่ 3.1 ค่า constraint c_i สามารถแทนด้วยสมการที่ 3.1

$$c_i(p_a, p_b) = \|p_a - p_b\| - d_i$$

หรือ

(3.1)

$$c_i(p_a, p_b) = \left\| \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} \right\| - d_i$$

c คือ เมตริกซ์ของ constraint ทั้งหมดแสดงดังสมการที่ 3.2 โดยมีขนาดเท่ากับ $m \times 1$ โดย m คือ จำนวน constraint

$$c = \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_m \end{bmatrix}$$

(3.2)

แรงที่กระทำกับวัตถุนี้ จะกระทำผ่านจุดมวลและกระจายไปยังจุดมวลอื่น ๆ ทั้งวัตถุ การคำนวณแรงที่กระจายไปยังส่วนต่างๆ ของวัตถุเราอาศัยวิธีการของ Lagrange multipliers ซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.3

$$JWJ^T \lambda = -JWQ^T \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.3 เวกเตอร์ λ คือ ตัวคูณ (multipliers) ซึ่งเป็นตัวที่เราต้องคำนวณหาค่า ส่วน W คือ inverse matrix ของมวล ซึ่งมีขนาด $3n \times 3n$ โดย n คือ จำนวนจุดมวลทั้งหมด และ Q คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวกเตอร์ของแรงภายนอกที่กระทำกับจุดมวลทั้งหมด ซึ่งมีขนาด $3n \times 1$ และ \mathbf{J} คือ Jacobian matrix ของ matrix \mathbf{c} (rigid constraint) ซึ่งมีขนาด $m \times 3n$ กำหนดสมการที่ 3.4

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{c}}{\partial \mathbf{p}} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial c_1}{\partial x_1} & \frac{\partial c_1}{\partial y_1} & \frac{\partial c_1}{\partial z_1} & \dots & \frac{\partial c_1}{\partial z_n} & \frac{\partial c_1}{\partial z_n} & \frac{\partial c_1}{\partial z_n} \\ \frac{\partial c_2}{\partial x_1} & \frac{\partial c_2}{\partial y_1} & \frac{\partial c_2}{\partial z_1} & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial c_m}{\partial x_1} & \frac{\partial c_m}{\partial y_1} & \frac{\partial c_m}{\partial z_1} & \dots & \frac{\partial c_m}{\partial z_n} & \frac{\partial c_m}{\partial z_n} & \frac{\partial c_m}{\partial z_n} \end{bmatrix}$$

โดย \mathbf{p} คือ เวกเตอร์แสดงตำแหน่งของจุดมวล และแต่ละแถวของ \mathbf{J} คือ อนุพันธ์ของ constraint c เทียบกับตำแหน่งของจุดมวล และ matrix \mathbf{J} จะต้องมีการอัปเดตหรือเปลี่ยนแปลงทุกครั้งเมื่อวัตถุเกิดการแตก เพราะการเชื่อมต่อของ constraint กับจุดมวลจะเปลี่ยนแปลงไป

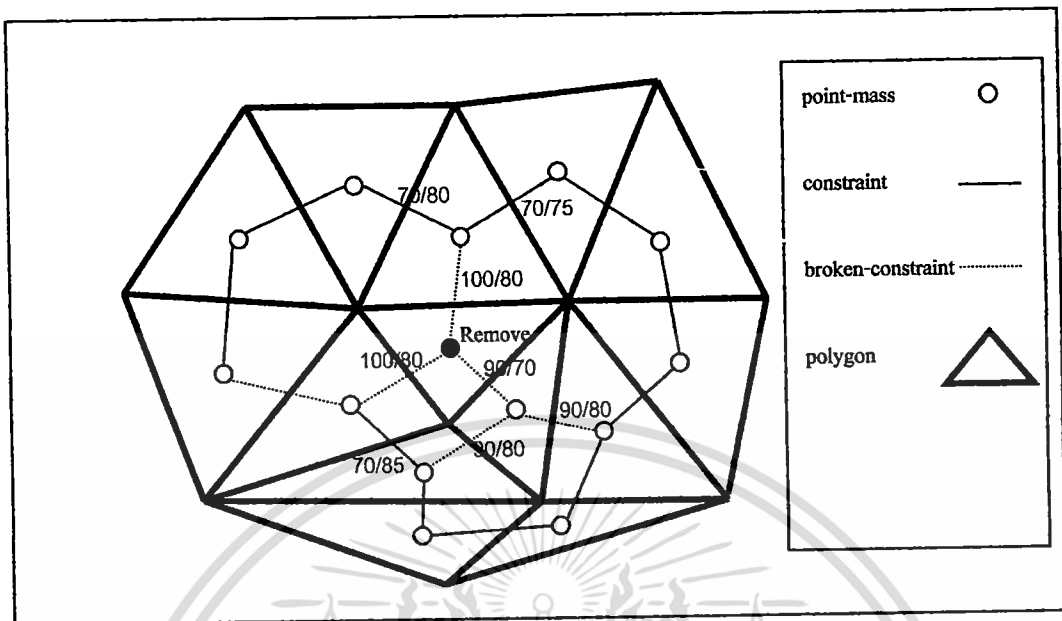
จากสมการที่ 3.3 สามารถแก้สมการหาค่า λ ได้ คือ

$$\lambda = (\mathbf{J}\mathbf{W}\mathbf{J}^T)^{-1}(-\mathbf{J}\mathbf{W}\mathbf{Q}^T) \quad (3.5)$$

หลังจากได้ค่า λ แล้ว ต่อไปจะหาค่า constraint force ($\hat{\mathbf{Q}}$) หรือ ผลลัพธ์ของแรงภายนอกทั้งหมดที่ถูกกระจายไปยัง constraint ทั้งหมด เพื่อนำไปพิจารณาว่า constraint ใด สมควรจะแตกหัก ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.6

$$\hat{\mathbf{Q}} = \mathbf{J}^T \lambda \quad (3.6)$$

ในรูปที่ 3.2 ถ้า ค่า constraint force ($\hat{\mathbf{Q}}$) มากกว่า constraint strength ($a > b$) จะทำให้แรงยึดเกาะถูกทำลายลงแทนด้วยเส้นประ และถ้าแรงยึดเกาะของจุดมวลใด ๆ ถูกทำลายลงหมด จะทำให้จุดมวลนั้นถูกทำลาย หรือ โพลีกอนนั้นแตก แสดงดังวงกลมที่บ



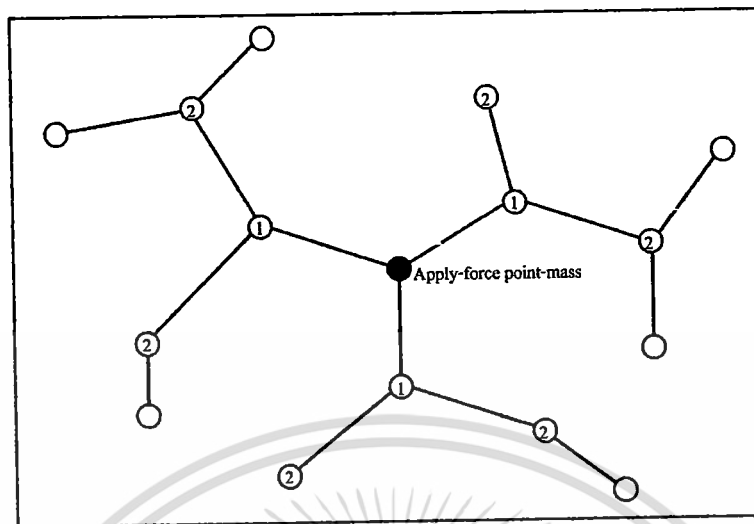
รูปที่ 3.2 การแตกของ โพลีกอน (a/b: a คือ constraint force และ b คือ constraint strength)

การคำนวณการแตกหักนี้ เป็นการคิดการกระจายของแรงในทุก ๆ ส่วนของวัตถุ และถ้าวัตถุประกอบไปด้วยจำนวนโพลีกอนมาก ๆ นั่นคือจำนวนจุดมวลและ constraint ที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้เมตริกซ์ JWJ^T มีขนาดใหญ่มากขึ้น ทำให้การหาค่าอินเวอร์สเมตริกซ์ JWJ^T ในสมการที่ 3.5 ใช้เวลานาน และไม่สามารถคำนวณหาค่าผลลัพธ์ในแบบ real-time ได้ และเราพบว่าวัตถุโดยทั่วไป เมื่อเราออกแรงกระทำต่อวัตถุ วัตถุจะเกิดการแตกเฉพาะบริเวณรอบ ๆ ของจุดที่ถูกกระทำเท่านั้น และขนาดความกว้างของบริเวณนี้จะขึ้นอยู่กับความแรงที่กระทำต่อวัตถุ ดังนั้นจึงใช้หลักการดังกล่าวมาพัฒนาวิธีการจำกัดขอบเขตการกระจายของแรง (Bounded Force Propagation) เพื่อลดขนาดของเมตริกซ์ลง นอกจากนี้ เมตริกซ์ JWJ^T สามารถจัดเตรียมไว้ล่วงหน้าได้ก่อนที่จะเกิดการชนกันจริง ๆ โดยอาศัยการทำนายตำแหน่งล่วงหน้าของอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส (Position Prediction) ว่า จะเกิดการชนกับวัตถุหรือไม่ ซึ่งรายละเอียดจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

3.2.1 การจำกัดขอบเขตการกระจายของแรง (Bounded Force Propagation)

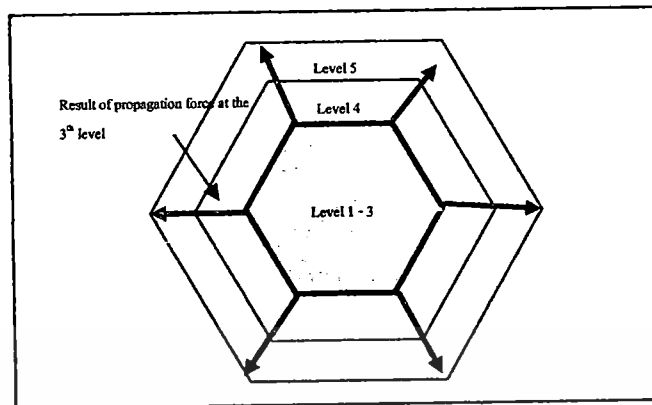
เมื่อวัตถุมีแรงมากระทำ แรงจะถูกกระทำผ่านจุดมวลภายในโพลีกอนนั้น และกระจายไปยังจุดมวลข้างเคียงผ่านทาง rigid-constraint ดังนั้นจุดมวลที่ถูกแรงกระทำ จะเป็นจุดมวลเริ่มต้น และจุดมวลอื่นที่เป็นจุดมวลข้างเคียงของจุดมวลเริ่มต้น จะถูกกำหนดให้อยู่ในระดับที่ 1 และจุดมวลข้างเคียงทั้งหมดของจุดมวลในระดับที่ 1 จะกลายเป็นจุดมวลในระดับที่ 2 ของจุดมวลเริ่มต้น โดยจุดมวลในระดับที่ 2 จะไม่ซ้ำกับระดับที่ 1 และเป็นอย่างนี้ไปเรื่อย ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 จุดมวลในแต่ละระดับ

หลังจากมีแรงมากระทำกับวัตถุ จะทำการกำหนดระดับสูงสุดที่แรงสามารถกระจายไปได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์นั้น ๆ ว่าสามารถคำนวณระดับสูงสุดได้ที่ระดับ เพื่อให้สามารถตอบสนองการสร้างแรงต้านของอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัสกลับมายังผู้ใช้ได้ในแบบ real-time ซึ่งในการจำลองแรงสัมผัสนั้นต้องการการตอบสนองได้ภายใน 1000 Hz หรือภายใน 1 มิลลิวินาที ดังนั้นในขั้นตอนแรกของโปรแกรม จึงต้องทำการทดสอบหาค่าระดับสูงสุดที่คอมพิวเตอร์เครื่องนั้น ๆ สามารถคำนวณได้ทัน จุดมวลและ constraint ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องจะอยู่ในระดับสูงสุดนี้ ทำให้เมตริกซ์มีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ เพื่อป้องกันไม่ให้อัตตุมมีการเคลื่อนที่ขณะมีแรงมากระทำ ดังนั้นจุดมวลบริเวณขอบ หรือจุดมวลในระดับสูงสุดทั้งหมดจะถูกกำหนดให้มีค่ามวลสูงมาก ๆ นอกจากนี้เมื่อวัตถุเกิดการแตก พบว่าบริเวณรอบ ๆ ของจุดที่แตกจะสามารถแตกได้ง่ายขึ้น ดังนั้นเพื่อความสมจริงมากขึ้น เมื่อโพลีกอนใดเกิดการแตก ค่าแรงยึดเกาะของโพลีกอนข้างเคียงจะถูกลดทอนลง เพื่อให้บริเวณใกล้เคียงสามารถแตกได้ง่ายขึ้น หลังจากขั้นตอนการกระจายแรงในแบบ real-time เพื่อให้สามารถคำนวณแรงต้านมายังผู้ใช้ได้ทันแล้วนั้น เราจึงค่อยกระจายแรงต่อไปในระดับขั้นที่สูงขึ้นที่ระดับ โดยการกระจายแรงนี้ต้องทำภายใน 30 Hz หรือภายในเวลาประมาณ 33.3 มิลลิวินาที เพื่อให้กราฟิกสามารถทำงานได้อย่างราบรื่นไม่เกิดการกระตุกขึ้น ดังรูปที่ 3.4 สมมติให้ระดับสูงสุดที่สามารถคำนวณแรงต้านได้ทันเท่ากับ 3



รูปที่ 3.4 พื้นที่แรงเงาคือระดับสูงสุดที่สามารถคำนวณแรงตอบสนองได้ทันทีในแบบ real-time และการกระจายแรงต่อไปในระดับที่สูงขึ้น

3.2.2 การทำนายตำแหน่งล่วงหน้าของอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส (Position Prediction)

ในการทำนายตำแหน่งล่วงหน้า ทำได้โดยใช้ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส ในแต่ละรอบเวลาการทำงาน of อุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส นั้น ซึ่งตำแหน่งล่วงหน้าแสดงดังสมการที่ 3.7

$$pp = n\vec{v}\Delta t \quad (3.7)$$

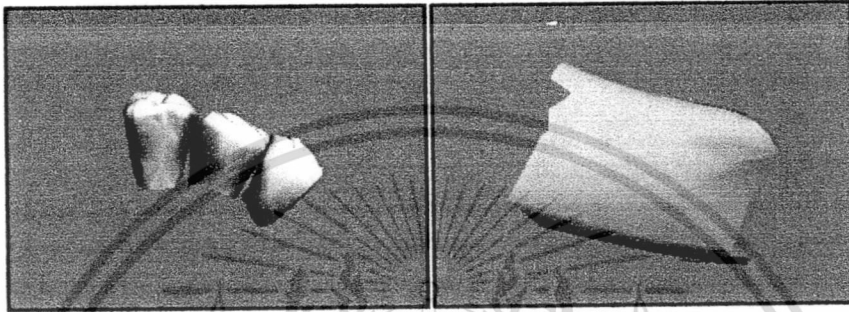
โดย pp คือตำแหน่งล่วงหน้า, n คือจำนวน time step ล่วงหน้า, \vec{v} คือความเร็วของอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส และ Δt คือรอบการทำงาน of อุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส

3.3 การโมเดลของพื้น เหยือก และหินปูน

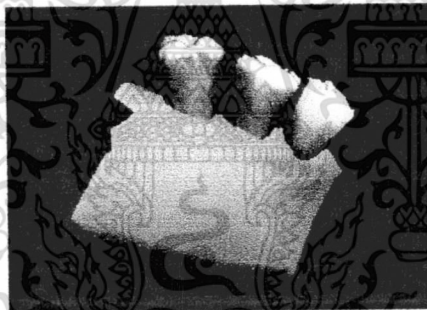
การจำลองการขูดหินปูนจะประกอบไปด้วยการสร้าง โมเดลของพื้น เหยือก และหินปูน โดยแต่ละโมเดลจะมีรูปร่าง และคุณสมบัติของพื้นผิว (Haptic property) เมื่อเราสัมผัสที่แตกต่างกัน ซึ่งได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของพื้นผิว (Stiffness : k) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพื้นผิวนั้นๆ (Friction : μ) โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะประกอบไปด้วย ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต (Static : μ_s) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ (Dynamic : μ_d)

3.3.1 การสร้างโมเดลพื้นและเหงือก

พื้นและเหงือกจะถูกสร้างโดยโปรแกรมสร้างวัตถุ 3 มิติ แล้วนำโมเดลนี้โหลดเข้าสู่โปรแกรม โดยจะมีค่าคุณสมบัติของพื้นผิวของพื้นคือ $k = 1.0$, $\mu_x = 0.2$ และ $\mu_y = 0.1$ ส่วนค่าคุณสมบัติของเหงือก คือ $k = 0.6$, $\mu_x = 0.0$ และ $\mu_y = 0.0$



รูปที่ 3.5 โมเดลของพื้นและเหงือกที่สร้างขึ้นจาก โปรแกรมสร้างวัตถุ 3 มิติ



รูปที่ 3.6 โมเดลพื้นและเหงือกขณะจำลองการขูดหินปูน

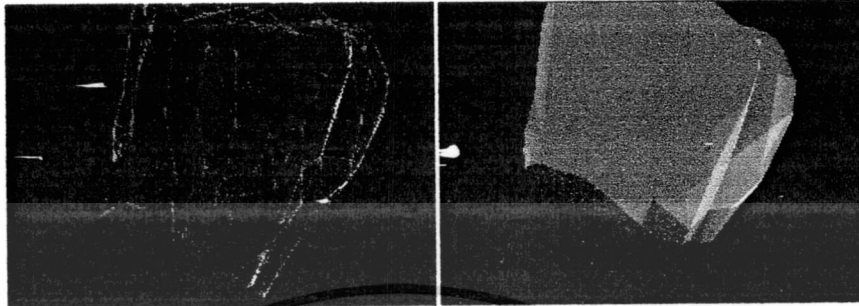
3.3.2 การสร้างโมเดลหินปูน

โมเดลพื้นและเหงือกจะประกอบไปด้วยโพลีกอนสามเหลี่ยม (Triangle polygon) เล็กๆ เชื่อมต่อกันเป็นเป็นรูปร่างของพื้นและเหงือก เมื่อนำ โมเดลของพื้นและเหงือกมาประกอบกันจะเกิดการตัดกัน (Intersection) ของโพลีกอนทั้งสองโมเดล ซึ่งก็คือบริเวณขอบเหงือกกับพื้นนั่นเอง ซึ่งโพลีกอน บริเวณนี้ จะถูกนำไปสร้างเป็นโพลีกอนของหินปูนต่อไป โพลีกอนของหินปูนจะถูกสร้างจากโพลีกอนของพื้นโดยมีลักษณะเป็นแผ่นเกาะอยู่บน โพลีกอนของพื้น ซึ่งจะเป็นไปตาม อัลกอริทึมดังต่อไปนี้

- 1) หาโพลีกอนของพื้นทั้งหมดที่ตัดกับโพลีกอนของเหงือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ใช้ฟังก์ชัน stochastic ในการสุ่มเลือกโพลีกอนของพื้นที่จะถูกนำไปสร้างเป็นหินปูน



รูปที่ 3.7 โพลีกอนที่ตัดกันระหว่างพื้นกับเหงือก

- 3) ใช้จุดมุมของโพลีกอนของพื้นสร้างโพลีกอนใหม่เป็นโพลีกอนของหินปูน
4) กำหนดคุณสมบัติพื้นผิวของหินปูนเป็น $k = 0.9$, $\mu_x = 0.6$ และ $\mu_y = 0.4$

3.4 การจำลองการขุดหินปูน

การจำลองการขุดหินปูนถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือ การจำลองแรง โดยใช้สปริงโมเดล คำนวณหาแรงต้านที่เกิดขึ้นเมื่อเรากระทำกับวัตถุต่างๆ โดยสัมพันธ์กับจุดปลายของอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส ส่วนที่สองคือ การจำลองการแตกของหินปูน

3.4.1 การจำลองแรง

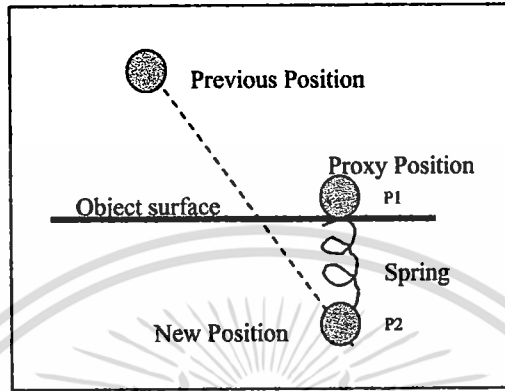
แรงต้านที่เกิดขึ้นเมื่อสัมผัสวัตถุเกิดจากการรวมกันของ แรงกดจากมือของผู้ใช้ และแรงจากการสั่นของเครื่องมือจำลองการขุดหินปูน และแรงทั้งสองส่วนนี้จะถูกนำไปใช้ป้อนให้กับจุดมวล ในโครงสร้างของหินปูนด้วย

3.4.1.1 แรงกดจากมือผู้ใช้

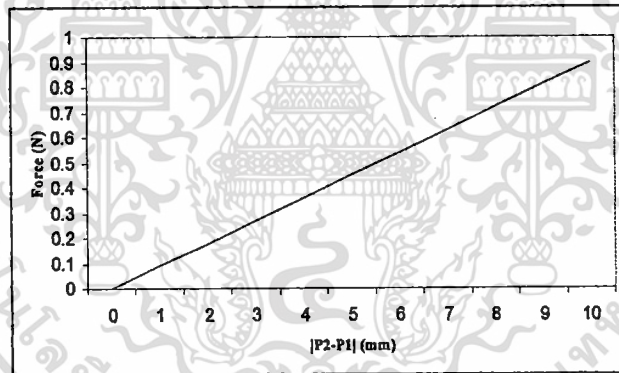
แรงกดนี้ คำนวณจากระยะห่างจากจุดปลายของเครื่องมือขุดหินปูนเสมือนกับพื้นผิวของวัตถุ เมื่อเครื่องมือขุดหินปูนเข้าไปในเนื้อของวัตถุ โดยอาศัยหลักการของ Hooke's law

$$F_s = k(p_2 - p_1) \quad (3.8)$$

จากสมการข้างบน k คือค่าความแข็งของพื้นผิววัตถุ, p_2 คือตำแหน่งปัจจุบันของจุดปลายของอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส และ p_1 คือจุดบนพื้นผิวของวัตถุที่มีระยะทางสั้นที่สุดเมื่อวัดจาก p_2



รูปที่ 3.8 การคำนวณแรงกด



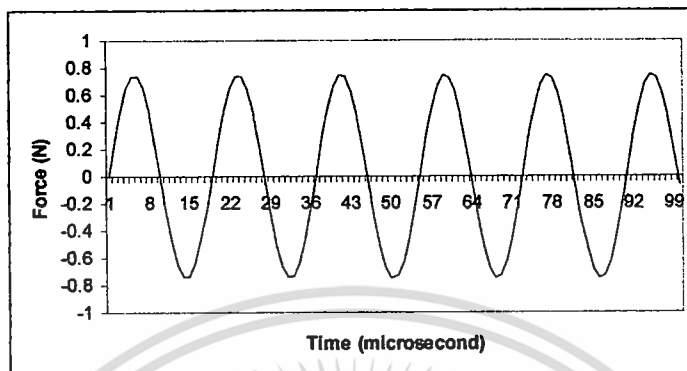
รูปที่ 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะทางในการกด

3.4.1.2 แรงสั่น

เกิดจากเครื่องมือสำหรับขูดหินปูน เพื่อให้การขูดทำได้เร็วขึ้น ซึ่งแรงสั่นคำนวณได้จากสมการข้างล่าง

$$F_v(t) = a * \sin(\tau * t * f) \quad (3.9)$$

จากสมการข้างบน a คือ แอมพลิจูด (amplitude) ของการสั่น, t คือ เวลา, T คือ คาบเวลา
การทำงานของอุปกรณ์จำลองแรงสั่นพัด (เท่ากับ 1ms) และ f ความถี่ของการสั่น (frequency)



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงสั่นกับเวลา

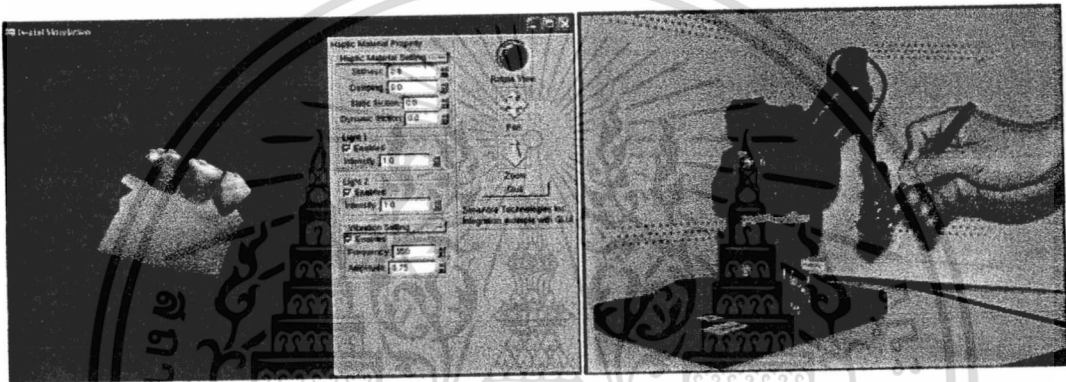
3.4.2 การจำลองการแตก

การจำลองการแตกของหินปูนจะใช้โมเดลและวิธีการจากหัวข้อ 3.1, 3.2 และ 3.3

บทที่ 4

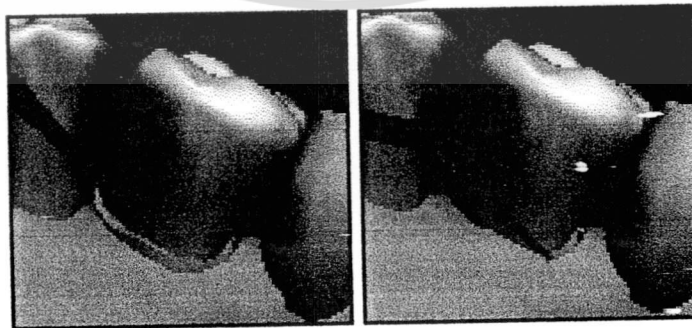
ผลการดำเนินงานวิจัยและพัฒนา

จากการศึกษา ออกแบบ และพัฒนาโปรแกรมสำหรับจำลองการชุดหินปูนด้วยอุปกรณ์จำลองแรงสั่นสะเทือน ได้เขียนโปรแกรมซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โปรแกรมสำหรับจำลองการชุดหินปูนด้วยอุปกรณ์จำลองแรงสั่นสะเทือน

เมื่อเปิดโปรแกรมจะมีตัวควบคุมอยู่ทางขวามือ สำหรับปรับเปลี่ยนคุณสมบัติพื้นผิวของหิน การปรับเปลี่ยนความเข้มของแสง การปรับความแรงการสั่นของอุปกรณ์ โดยปรับค่า amplitude และ frequency นอกจากนี้ ผู้ใช้ยังสามารถปรับเปลี่ยนมุมมองของตัวหินได้ ทั้งการหมุน การย้ายตำแหน่ง และการซูมเข้าหรือออก



รูปที่ 4.2 ขณะทำการชุดหินปูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. S. Choi et al. "Scalable Force Propagation Approach for Web-based Deformable Simulation of Soft Tissues," *Proceedings of ACM Web3D*, pp. 185–93, 2002.
- [2] J. O'Brien and J. Hodgins. "Graphical Modeling and Animation of Brittle Fracture," *SIGGRAPH 99 Conf. Proceedings*, pp. 287–296, 1999.
- [3] S. Gobron and N. Chiba. "Crack Pattern Simulation Based on 3D Surface Cellular Automaton," *The Visual Computer*, Vol. 17, June, pp.287-309, 2001.
- [4] J. Smith, A. Witkin, and D. Baraff "Fast and Controllable Simulation of the Shattering of Brittle Objects," *Computer Graphics Interface*, pp. 27-34, May 2000.
- [5] L. Kim, Y. Hwang, S H. Park and S. Ha "Dental Training System using Multi-modal Interface," *Computer-Aided Design & Applications*, Vol. 2, No. 5, 2005, pp 591-598
- [6] Kevin T. Mcdonnell , Houng Qin and Robert A. Wlodarczyk, "Virtual Clay : A Realtime Sculpting System with Haptic Toolkits" *ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*, New York, USA , pp. 179 - 190 , 2001.
- [7] Ignacio Llamas , Alexander Powell , Jarek Rossignac , Chris D. Shaw , "Bender: A Virtual Ribbon for Deforming 3D Shapes in Biomedical and Styling Applications" , *ACM Symposium on Solid and Physical Modeling(SPM'05)* , Cambridge, Massachusetts ,pp. 89 - 99 , 2005.
- [8] Wan-Chun Ma , Fu-Che Wu , Ming Ouhyoung , "Skeleton Extraction of 3D Objects with Radial Basis Function" , *Shape Modeling International (SMI 2003)*, Seoul, Korea, pp. 207-215 ,2003.
- [9] M. Müller, "Real-Time Simulation of Deformation and Fracture of Stiff Materials," (*Eurographics CAS*), *Computer Animation and Simulation 2001*, pp 113-124
- C.-H. Ho, C. Basdogan, and M. A. Srinivasan. "Efficient Point-based Rendering Techniques for Haptic Display of Virtual Objects," *Presence*, Vol. 8, No.5 , pp. 477–491, 1999.
- [10] N. Melder and W. S. Harwin. "Extending the Friction Cone Algorithm for Arbitrary Polygon Based Haptic Objects," *Proceedings of the IEEE-VR*, pp. 234-241, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] T. Moller. "A Fast Triangle-Triangle Intersection Test," *J. Graphics Tools*, 2(2):25--30, 1997.
- [12] K. Perlin. "An Image Synthesizer," *SIGGRAPH 85Conf. Proceedings*, pp. 287-296, 1985.
- [13] "Specifications for The PHANTOM[®] Premium 1.5/6DOF Haptic Devices," [Online], available World Wide Web, URL: <http://www.sensable.com> (Accessed July 2004)
- [14] A. Witkin and D. Baraff, "Physically Based Modeling: Principles and Practice," *SIGGRAPH Course Notes, ACM SIGGRAPH*, 1997.
- [15] A. Witkin, M. Gleicher and W Welch. "Interactive Dynamics," *In Proceedings of the 1990 Symposium on Interactive 3D Graphics*, Vol. 24, pp. 11-21, March 1990.
- [16] D. Terzopoulos and K. Fleischer. "Modeling Inelastic Deformation: Viscoelasticity, Plasticity, Fracture," *In Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings)*, Vol. 22, pp. 269-278, August 1988.
- [17] C. Ericson, "Real-Time Collision Detection," Morgan Kaufmann, USA, 2005