



รายงานฉบับสมบูรณ์

Final Report

เทคนิคสื่อประสมและวีอาร์เพื่อการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้กับคอมพิวเตอร์ และระหว่างคอมพิวเตอร์กับคอมพิวเตอร์ (Multimedia and VR Techniques for Human-Computer and Computer-Computer Communications)

รศ.ดร.นพพร โชติกกำธร

นายนันทพล สมร่าง

นายภัทวธ พิชัยชาญเลิศ

Assoc.Prof. Dr.Nopporn Chotikakamthorn

Mr.Nontapol Somrang

Mr.Pathawut Pichaichanleart

RCPI  
DA  
769  
V9  
๒116ก

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 83642  
วัน,เดือน,ปี...1.๑.๐.๒. 2551

ห้องปฏิบัติการวิจัยสื่อประสมและระบบเสมือน  
โครงการสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT)  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
กันยายน พ.ศ.2549

b. 11992184  
i. ....

Multimedia and Virtual Research Laboratory  
Research Center for Communications and Information Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
September 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก โครงการสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ(Research Center for Communications and Information Technology : ReCCIT) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2549 วงเงินงบประมาณ 83,794 บาท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ |

## บทสรุปย่อ

งานวิจัยเรื่องเทคนิคสื่อประสมและวีอาร์เพื่อการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้กับคอมพิวเตอร์ และระหว่างคอมพิวเตอร์กับคอมพิวเตอร์ นี้แบ่งเป็นออกเป็น 2 งานวิจัยย่อย ได้แก่ การศึกษาและพัฒนาเทคนิคการจำลองการชูดหินปูนแบบโต้ตอบได้ด้วยอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส (Force Feedback Device) และการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการปรับเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุโดยใช้หลักการ Pseudo-Physical Simulation ในส่วนแรกของงานวิจัยเป็นการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการจำลองการชูดหินปูนแบบโต้ตอบได้ด้วยอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส (Force Feedback Device) เพื่อใช้ในการฝึกฝน เพิ่มความชำนาญ ให้แก่นักศึกษาทันตแพทย์

ในส่วนของโปรแกรมการจำลองการชูดหินปูนนี้ ได้สร้างโมเดลขึ้นมา 3 ส่วน นั่นคือ ฟัน เหงือก และหินปูน โดยโมเดลทั้งหมดนี้ สามารถสัมผัสหรือชูด ผ่านอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส เสมือนผู้ใช้งานได้กระทำกับวัตถุ หรือเครื่องมือชูดหินปูนจริงๆ และแต่ละโมเดลมีค่าคุณสมบัติของพื้นผิวแตกต่างกัน โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ค่าแรงเสียดทานจลน์และแรงเสียดทานสถิต ฟันถูกสร้างให้เป็นวัตถุที่มีความแข็งด้วยโปรแกรมสร้างวัตถุ 3 มิติ ส่วนเหงือกจะสร้างให้เป็นวัตถุที่มีความอ่อนนุ่ม ส่วนวิธีการที่ใช้ในการสร้างหินปูนนั้นจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนสร้างภาพกราฟิก และส่วนการจำลองทางกายภาพของหินปูน โดยจะอาศัยหลักทางกายภาพของวัตถุที่มีความเปราะ สามารถแตกหักได้ คือ หินปูนจะประกอบไปด้วย จุดมวล (point-masses) แทนแผ่นหินปูนชิ้นเล็กๆ เชื่อมต่อกับ จุดมวลหรือแผ่นหินปูนอื่น ๆ ด้วย rigid-constraint เปรียบเสมือนเป็นแรงยึดเกาะ (bond) ระหว่างกันและกันของแต่ละแผ่นของหินปูน นอกจากนี้ยังมีแรงยึดเกาะอีกส่วนหนึ่งที่ถูกสร้างขึ้นสำหรับยึดระหว่างหินปูนกับฟัน แรงที่ใช้ในการจำลองการชูดหินปูน หรือแรงที่ใช้ในการทำลายแรงยึดเกาะเหล่านี้ ได้มาจากแรงของการกดเข้าไปในเนื้อหินปูนของเครื่องมือชูดหินปูน ซึ่งจะใช้แบบจำลองของสปริง (spring model) และแรงที่ได้จากการสั่นของเครื่องมือชูดหินปูน เราจะใช้ผลลัพธ์ของการกระจายแรงเหล่านี้ มาพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าแรงยึดเกาะ (bond strength) ว่าส่วนใดของหินปูนที่สมควรจะแตกหัก โดยในการพัฒนาโปรแกรม อาศัย Microsoft Visual C++ 6.0 และใช้ Haptic Library ของอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัสในส่วนของจำลองแรง การสร้างวัตถุเสมือน คือ ฟัน หินปูน และเหงือกใช้ OpenGL ร่วมกับโปรแกรมสร้างวัตถุ 3 มิติ

ในส่วนของงานวิจัยย่อยที่สอง เป็นการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการปรับเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุโดยใช้หลักการ Pseudo-Physical Simulation สำหรับวัตถุทั่วไปที่มีอยู่ในธรรมชาตินั้น

จะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวของแต่ละชนิดวัตถุ เช่น เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างเส้นเชือกและเส้นลวด เส้นเชือกจะมีความยืดหยุ่นมากกว่าเส้นลวด เมื่อมีการหัก เส้นเชือกจะเกิดการโค้งงอขึ้น แต่ถ้าเป็นเส้นลวดจะเกิดการหักมุมแทนที่จะเกิดการโค้งงอ ดังนั้น เทคนิค Pseudo-Physical Simulation ที่พัฒนาขึ้นนี้ เป็นการเลียนแบบคุณสมบัติเหล่านี้ของวัตถุจริงในธรรมชาติ แต่ไม่ได้นำกฎทางฟิสิกส์ของคุณสมบัติของวัตถุจริงในธรรมชาติมาใช้ ซึ่งจะเป็นการลดความซับซ้อนของการคำนวณทางคณิตศาสตร์ลงได้ อีกทั้งยังคงคุณสมบัติความยืดหยุ่นในการสร้างวัตถุของการเป็นวัตถุเสมือนเอาไว้ได้ โดยเทคนิค Pseudo-Physical Simulation นี้ ได้เลือกใช้เส้นโค้งชนิด Bezier มาเป็นวัตถุพื้นฐานในการคำนวณ เนื่องจากเส้นโค้งชนิด Bezier นั้น มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับการปรับเปลี่ยนรูปทรงของวัตถุจริงโดยใช้มือของมนุษย์

ในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้ได้แบ่งขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ขั้นตอนแรกเป็นการคำนวณ Collision Detection ขั้นตอนที่สองจะนำหลักการ Pseudo-Physical Simulation มาใช้ในการคำนวณรูปทรงของวัตถุที่มีการปรับเปลี่ยน และขั้นตอนที่สามเป็นการแสดงผลของวัตถุที่มีการปรับเปลี่ยนรูปทรงเสร็จเรียบร้อยแล้ว ซึ่งในส่วนของ การพัฒนา อาศัย Microsoft Visual C++ 6.0 และใช้ OpenGL ในการแสดงภาพกราฟิก และใช้ Virtual hand Library เพื่อติดต่อกับอุปกรณ์อินพุตที่เป็นถุงมืออิเล็กทรอนิกส์ โดยโปรแกรมทั้งหมด สร้างและทดสอบภายใต้ระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows XP

## บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ถูกแบ่งเป็นออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การศึกษาและพัฒนาเทคนิคการจำลองการชูดหินปูนแบบโต้ตอบได้ด้วยอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส (Force Feedback Device) และการศึกษาและเทคนิคการปรับเปลี่ยนรูปทรงของวัตถุโดยใช้หลักการ Pseudo-Physical Simulation ในส่วนแรกของงานวิจัยเป็นการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการจำลองการชูดหินปูนแบบโต้ตอบได้ด้วยอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส (Force Feedback Device) โดยในโปรแกรมการจำลองการชูดหินปูนนี้ ได้สร้างโมเดลขึ้นมา 3 ส่วน นั่นคือ ฟัน เหงือก และหินปูน โดยโมเดลทั้งหมดนี้ สามารถสัมผัสหรือชูด ผ่านอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส เสมือนผู้ใช้งานได้กระทำกับวัตถุจริง ส่วนวิธีการที่ใช้ในการจำลองอาศัยการประยุกต์และพัฒนาเทคนิคการจำลองทางกายภาพของวัตถุที่มีความแปรปรวนสามารถแตกหักได้ ในส่วนงานวิจัยย่อยที่สอง เป็นการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการปรับเปลี่ยนรูปทรงของวัตถุโดยใช้หลักการ Pseudo-Physical Simulation ซึ่งจะเป็นการเลียนแบบคุณสมบัติของวัตถุในธรรมชาติ แต่ไม่ได้นำกฎทางฟิสิกส์มาใช้คำนวณ โดยได้ทำการพัฒนาเทคนิคการจำลองซึ่งทำให้ผู้ใช้สามารถปรับเปลี่ยนรูปทรงที่เป็นเส้นได้ โดยมีการตอบสนองคล้ายวัตถุจริงที่มีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันออกไป ในขณะที่ความซับซ้อนในการประมวลผลน้อยกว่าการจำลองด้วยวิธีการทางกายภาพ (physically-based simulation)

## Abstract

This research project is divided into two parts. The first part deals with the study and development of techniques for interactive simulation for dental plaque removal using a force feedback device. The second part is on simulation of direct manipulation of 3D curves using pseudo-physical simulation. For the first part, a study was carried out to develop an interactive training system which performs haptic simulation for practicing dental plaque removal. Three object types simulated were teeth, plaque, and gums. All of them can be interacted with through a single-point-of-contact haptic device. A method has been developed for dental plaque simulation, based on a physically-based modeling of fragile material. The second part of the project deals with the study and development of direct manipulation of 3D curves using pseudo-physical simulation. The approach simulates physical property of manipulated objects without the use of physical models in the calculation. Simulation technique was developed for string object manipulation. Simulation was performed such that the behavior (shape) of the object under manipulation was dependent on its physical property. The method avoids high computational cost of the direct physically-based simulation approach.

# สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทสรุปย่อ	II
บทคัดย่อ	IV
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.1.1 การศึกษาและพัฒนาเทคนิคการจำลองการชูดหินปูนแบบโต้ตอบได้ด้วยอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส	2
1.1.2 การศึกษาและพัฒนาเทคนิคการปรับเปลี่ยนรูปทรงของวัตถุโดยใช้หลักการ Pseudo-Physical Simulation	2
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย	3
1.4 สภาพแวดล้อมในการดำเนินงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การศึกษาการกระจายของแรงภายในวัตถุและการจำลองการแตกหัก	4
2.2 การศึกษาการจำลองวัตถุ 3 มิติ โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพเทียม	9
2.2.1 Collision Detection	9
2.2.2 Bezier Curve Fragmentation	10
บทที่ 3 การออกแบบและพัฒนาโมเดลจำลองการแตกหักของหินปูน	
3.1 การโมเดลของฟัน เหงือก และหินปูน	12
3.1.1 การสร้างโมเดลฟันและเหงือก	12
3.1.2 การสร้างโมเดลหินปูน	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2.1 ส่วนกราฟิก	13
3.1.2.2 ส่วนกายภาพ	15
3.2 การจำลองการขูดหินปูน	17
3.2.1 การจำลองแรง	17
3.2.1.1 แรงกดจากมือผู้ใช้	17
3.2.1.2 แรงลื่น	18
3.2.2 การจำลองการแตก	19
3.3 ผลการดำเนินงานวิจัยและพัฒนา	19
บทที่ 4 การศึกษาและพัฒนาเทคนิคการจำลองวัตถุ 3 มิติโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพเทียม	
4.1 Gesture-based Direct Manipulation of a Bezier curve	21
4.2 Physical constraints	22
4.3 การจำลองเชิงกายภาพเทียม (pseudo-physical simulation)	22
4.4 ผลการดำเนินงานวิจัยและพัฒนา	23
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัยและพัฒนา	
5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ	26
5.1.1 ความละเอียดของโมเดล	26
5.1.2 การคำนวณค่าทางคณิตศาสตร์	26
5.2 ข้อเสนอแนะ	27
บรรณานุกรม	28
ภาคผนวก บทความและผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	30

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ทางด้าน สื่อประสม (Multimedia) และระบบเสมือนจริง (Virtual Reality) มีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว พร้อมทั้งอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์ (Hardware) และซอฟต์แวร์ (Software) มีราคาถูกลงและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นทำให้เกิดการใช้งานอย่างแพร่หลาย ทำให้เกิดเทคโนโลยีและโปรแกรมประยุกต์ต่อเนื่องตามมามากมาย ทั้งในแง่เพื่อการศึกษา, วิทยาศาสตร์, อุตสาหกรรม, หรือความบันเทิง นอกจากนี้ยังมีการนำเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์กราฟิกมาผนวกเข้ากับอุปกรณ์ ตัวอย่าง ถุงมือ (Cyber Glove) แว่นตา (Cyber Eyes) และอุปกรณ์จำลองแรง (Force Feedback Device) เป็นต้น เพื่อสร้างและพัฒนางานด้านระบบเสมือนจริง (Virtual Reality) ทำให้มนุษย์สามารถติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ได้โดยตรงและเป็นธรรมชาติ ไม่ใช่เพียงแค่การสื่อสารผ่านการมองเห็น เสียง หรือการสัมผัสในรูปแบบของเมาส์ คีย์บอร์ด จอยสติค แต่สามารถเข้ามาควบคุมและสื่อสารผ่านอุปกรณ์โดยตรง ซึ่งอุปกรณ์จะมีการตอบสนองกลับไปที่ผู้ใช้ผ่านการสัมผัสหรือแรง

สำหรับอุตสาหกรรมหลายๆ ด้าน เริ่มมีการพัฒนาและตื่นตัวกับการนำวิทยาการทางด้านระบบเสมือนจริงเข้ามาช่วยในระบบงานด้านการออกแบบ การผลิต และการฝึกหัด เพื่อลดต้นทุนและเวลามากยิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น นำอุปกรณ์จำลองแรงมาช่วยในระบบการออกแบบ ลวดลายบนภาชนะ ออกแบบรองเท้า หรือแม้กระทั่งระบบฝึกหัดการผ่าตัดผ่านเครือข่าย เป็นต้น

ปกติสภาวะแวดล้อมเสมือนจริง แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ลักษณะที่ผู้ใช้เข้าไปมีส่วนร่วมภายใต้สภาวะแวดล้อมเสมือนจริง (Immersive) ซึ่งลักษณะดังกล่าว จะมีส่วนร่วมมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับกระบวนการของผู้ใช้และอุปกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้ เช่น หน่วยแสดงผลสวมศีรษะ (Head-Mounted Display), ถุงมืออิเล็กทรอนิกส์ (Cyberglove), อุปกรณ์บอกตำแหน่งแบบ 6 แกน เป็นต้น และลักษณะที่ผู้ใช้ปฏิบัติอยู่นอกสภาวะแวดล้อมเสมือนจริง (Non-Immersive) คือ ผู้ใช้ทำงานในสภาวะแวดล้อมแบบเดสก์ท็อป ซึ่งการปฏิสัมพันธ์ภายใต้สภาวะแวดล้อมเสมือนจริง มีพื้นฐานมาจากการปฏิสัมพันธ์ภายใต้สภาวะแวดล้อม 2 มิติ ซึ่งแตกต่างกันที่อุปกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้ โดยขึ้นอยู่กับการทำงานภายใต้เงื่อนไขในแต่ละสภาวะแวดล้อม

งานวิจัยฉบับนี้ได้แบ่ง เป็น 2 งานวิจัยย่อย ดังนี้

1.1.1 การศึกษาและพัฒนาเทคนิคการจำลองการขูดหินปูนแบบโต้ตอบได้ด้วยอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส (Force Feedback Device)

งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบโมเดลของฟัน เหงือก และหินปูน ทั้งทางด้านกราฟิก (Graphical model) และทางด้านกายภาพ (Physical model) นอกจากนี้จะกล่าวถึงวิธีการสร้างแรงและการกระจายของแรงในวัตถุที่มีความแข็ง แต่สามารถแตกหักได้ สำหรับรายละเอียดในการออกแบบและโครงสร้างของโปรแกรมจะได้กล่าวในบทต่อไป

1.1.2 การศึกษาและพัฒนาเทคนิคการปรับเปลี่ยนรูปทรงของวัตถุโดยใช้หลักการ Pseudo-Physical Simulation

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้เสนอเทคนิคใหม่ที่จะช่วยลดความซับซ้อนของการประมวลผลอันเนื่องมาจากการเพิ่มคุณสมบัติทางฟิสิกส์ โดยใช้การผสมผสานกันของ Direct Manipulation Technique และ Pseudo-Physical Simulation Model

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการแตกหักของหินปูน และสร้างแบบจำลองของโมเดลฟัน เหงือก และหินปูน
2. พัฒนาโปรแกรมจำลองการขูดหินปูน
3. นำโมเดลและผลการทดลองไปใช้ศึกษาและจำลองการแตกของวัตถุที่มีความแข็งได้ในโอกาสต่อไป
4. พัฒนาเทคนิคสำหรับการปรับเปลี่ยนรูปทรงของเส้นโค้ง
5. พัฒนาโปรแกรมต้นแบบสำหรับสร้างวัตถุประเภทเส้นโค้ง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. จำลองการแตกหักของหินปูน โดยแรงที่กระทำกับหินปูนได้มาจากแรงกดและแรงจากการสั่นของอุปกรณ์ขูดหินปูนเสมือน
2. ใช้อุปกรณ์ร่วม ในการทำงานประเภทจำลองแรง คือ PHANTOM Premium 1.0 with Encoder Finger stylus

#### 1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

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

#### 1.5 สภาพแวดล้อมในการดำเนินงานวิจัย

สภาพแวดล้อมหมายถึงถึงอุปกรณ์ ระบบปฏิบัติการ ที่ใช้ในการพัฒนา และการทำงานโครงการ 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 ในการสร้างโมเดลของพื้นและเชิงอก
5. ใช้ Haptic library เพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์จำลองแรงสัมผัสเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพิ่มทักษะและความชำนาญทางด้านการชูดหินปูนให้แก่นักศึกษาทันตแพทย์
2. ลดค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์การฝึกหัดการชูดหินปูน และลดวัสดุที่ใช้แล้วหมดไป เช่น ฟันพลาสติก และหินปูนเทียม เป็นต้น
3. นำไปสร้างแบบจำลองของการแตกหักของวัตถุอื่น ๆ เมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำ
4. เป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์อื่นๆ เกี่ยวกับอุปกรณ์จำลองการสัมผัส

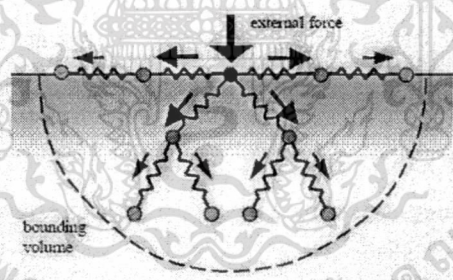
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การศึกษาการกระจายของแรงภายในวัตถุและการจำลองการแตกหัก

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

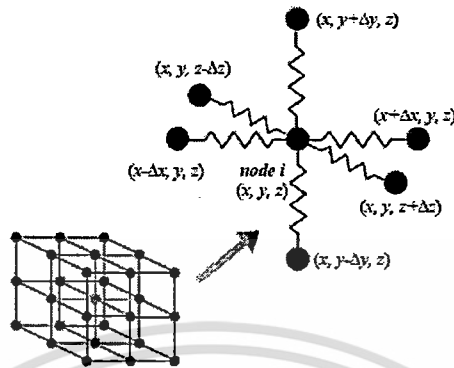


รูปที่ 2.1 การกระจายแรงโดยใช้แมสสปริงโมเดล

- สมการของแรงที่กระทำต่อระบบ

สำหรับวัตถุที่มีปริมาตรที่ถูกแบ่งเป็นโหนดและเชื่อมต่อกันด้วยสปริง แต่ละสปริงจะเป็นไปตามกฎ Hook's Law และการเคลื่อนที่ของแต่ละโหนดจะถูกหน่วงด้วย damping force ที่มีสัดส่วนตามความเร็วของแต่ละโหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การจำลองวัตถุที่มีความยืดหยุ่นด้วย mass-spring model

จากรูปที่ 2.2 โหนด  $i$  ถูกเชื่อมต่อกับสปริงกับโหนดใกล้เคียงอีก 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  $\Delta t$  เป็นเวลาในแต่ละ time step, ตำแหน่งของโหนด  $i$  ที่เวลา  $t + \Delta t$  คือ  $u_i(t + \Delta t)$  ซึ่งจะถูกคำนวณโดยใช้ตำแหน่งในเวลาปัจจุบัน  $u_i(t)$  และ ตำแหน่งในช่วงเวลาที่ผ่านไป  $u_i(t - \Delta t)$

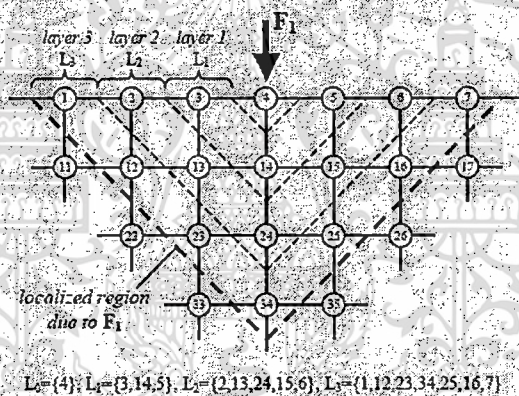
$$\frac{du}{dt} \approx \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{u(t + \Delta t) - u(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (2.2)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การกำหนดขอบเขตกระจายของแรง

จากรูปที่ 2.3 แสดงอาร์เรย์ของโหนดใน 2 มิติ เมื่อ โหนด 4 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงภายนอก  $F_1$  มากกระทำ 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

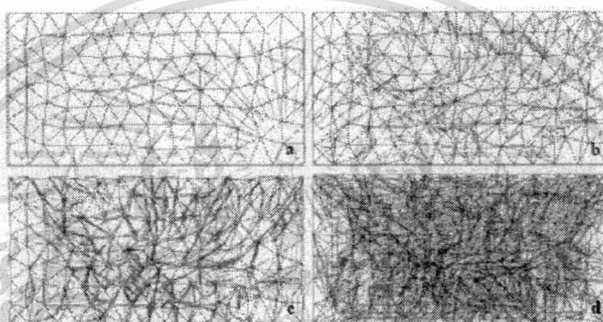
สำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบไม่มาก โหนดที่อยู่ไกลมาก ๆ เราสามารถไม่สนใจได้ "penetration depth" เป็นวิธีจำกัดจำนวน เลเยอร์ของโหนดที่จะถูกกระจายแรงไป จำนวนโหนดที่ถูกกระจายแรงไป (affected nodes) เป็นไปตามสมการที่ 1.4

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

โดย  $n$  คือจำนวนเลเยอร์ ดังนั้นเราสามารถควบคุมความซับซ้อนของการคำนวณได้โดยการควบคุมค่า  $n$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

James F., O'Brien, Jessica K. และ Hodgins[2] ได้นำเสนอเทคนิคการจำลองวัตถุที่มีความยืดหยุ่น รวมทั้งการโมเดลการแตกหักและการกระจายเส้นทางการแตกกับวัตถุ 3 มิติที่มีปริมาตร โดยใช้วิธีการไฟไนต์ เอลิเมนต์ (finite element method) วิเคราะห์ความเค้นภายในวัตถุเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ ในการจำลองนี้จะกำหนดจุดเริ่มต้นของการแตกที่เหมาะสมและทิศทางของการแตกที่ควรกระจายไป จากผลการทดลองโดยใช้วัตถุที่มีจำนวนโหนดเท่ากับ 338 โหนด 1109 เอลิเมนต์ พบว่าเวลาที่ใช้ในการจำลองการแตกหักนี้มีค่าเท่ากับ 339 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่นานและไม่เหมาะกับงานแบบ real time เป็นอย่างยิ่ง

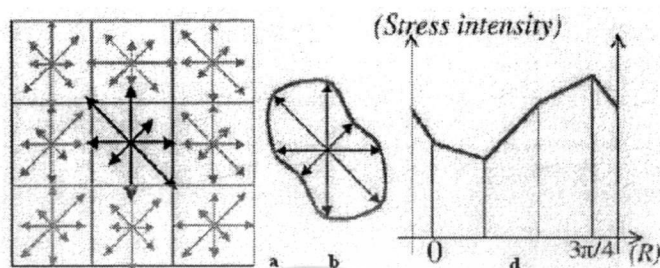


รูปที่ 2.4 พื้นผิวของวัตถุ : a พื้นผิวเริ่มต้นของวัตถุ; b พื้นผิวเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ; c เหมือน b แต่มีแรงมากขึ้น d: การแตกภายในวัตถุ แสดงเป็น wire frame

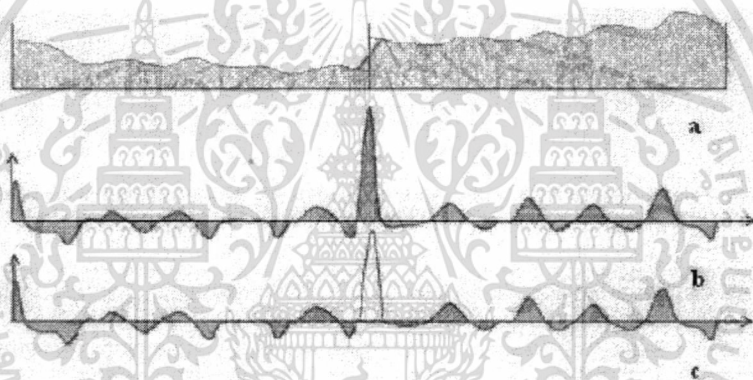
Stephane Gobron และ Norishige Chiba[3] ได้นำเสนอวิธีการการกระจายการแตกบนพื้นผิว 3 มิติใด ๆ วิธีการนี้สามารถใช้ได้กับทุกประเภทของการแตก และทุกประเภทของวัตถุ 3 มิติที่ใช้การโมเดลแบบ สามเหลี่ยมต่อกันเป็นวัตถุ (triangulated 3D object) การโมเดลนี้มีข้อดีคือ ใช้วิธีแก้ปัญหา แบบใช้หลักการกึ่งกายภาพของวัตถุ (semi-physical solution) ทำให้ผู้ใช้สามารถควบคุมการแตกได้ (controllable) และง่ายต่อการพัฒนาเพิ่มเติม (extensible) วิธีที่ใช้ขึ้นเป็นการวิเคราะห์ สเปกตรัมความเค้น (stress spectrum) เพื่อวิเคราะห์หาเส้นทางการแตกที่ควรกระจายไป สเปกตรัมความเค้นจะถูกกำหนดไปบนพื้นผิวของวัตถุโดยการแบ่งวัตถุเป็นสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ เรียกว่าเซลล์ (cell) ในแต่ละเซลล์ประกอบด้วย ทิศทาง Cartesian เป็นตัวกำหนด ความเค้นของสเปกตรัม โดยการสร้างสเปกตรัมความเค้นถูกสร้างจากความแตกต่างของความหนาของพื้นผิววัตถุ ถ้าความสูงของแต่ละเซลล์มีค่าความต่างกันมาก จะทำให้สเปกตรัมในเซลล์นั้นมีค่ามากตามไปด้วย สำหรับการจำลองการแตกและทิศทางการกระจายการแตกจะวิเคราะห์จากสเปกตรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นนี้ โดยทิศทางที่ควรกระจายไปขึ้นอยู่กับ ทิศทาง Cartesian ของสเปกตรัมความเค้นในแต่ละเซลล์



รูปที่ 2.5 สเปกตรัมความเค้นแสดงเป็นกราฟิก : a 1 เซลล์; b ฟิวด์ความเค้น (stress field); c สเปกตรัมความเค้น

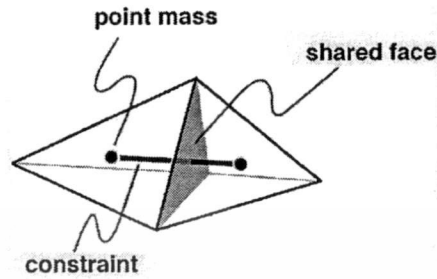


รูปที่ 2.6 การสร้างสเปกตรัมจากความต่างกันของความสูงของพื้นผิววัตถุ และแสดงการตัดสเปกตรัมที่ไม่ต่อเนื่องเพื่อแก้ปัญหาคำนวณที่จะผิดพลาด

J. Smith, A. Witkin และ D. Baraff [4] ได้นำเสนอเทคนิคสำหรับการจำลองการแตกหักของวัตถุที่มีความแข็งแต่เปราะ โดยวัตถุจะประกอบไปด้วยรูปทรง tetrahedra ขึ้นเล็กๆ ต่อกันเป็นรูปทรง และตรงกลางของ tetrahedral จะถูกแทนด้วยจุดมวล เชื่อมต่อกันด้วย distance-preserving linear constraints แทนการเชื่อมต่อแบบสปริง ข้อกำหนดของวัสดุที่มีความแข็ง คือแต่ละจุดบนวัสดุที่มีความแข็งจะรักษาระยะห่างระหว่างจุดให้คงที่เสมอ เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ การใช้ข้อกำหนดนี้แทนการปรับค่าความแข็งของสปริง ทำให้ลดเวลาในการคำนวณ พร้อมทั้งยังสามารถควบคุมคุณสมบัติของการแตกของวัตถุได้ และใช้วิธีการของ Lagrange multipliers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการคำนวณการกระจายของแรงไปยังจุดมวลต่าง ๆ และเมื่อผลลัพธ์ของแรงที่กระจายไปมากกว่าค่าแรงยึดเกาะระหว่างกันจะทำให้เกิดการแตกหักขึ้น

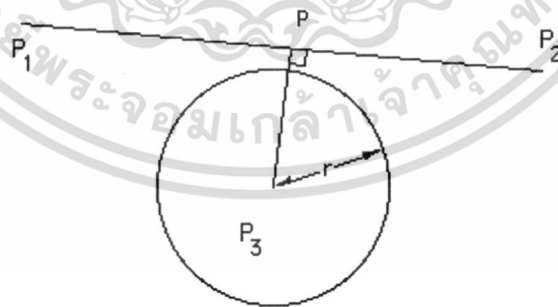


รูปที่ 2.7 ลักษณะการเชื่อมต่อของจุดมวลระหว่าง 2 tetrahedra

## 2.2 การศึกษาการจำลองวัตถุ 3 มิติ โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพเทียม

### 2.2.1 Collision Detection

สำหรับการทำ 3D Direct Manipulation จำเป็นต้องการคำนวณหาจุดที่เกิดการชนกันระหว่างถุงมืออิเล็กทรอนิกส์ กับวัตถุเสมือนที่ต้องการปรับเปลี่ยน วิธีที่ง่ายที่สุดคือการสร้างทรงกลมสมมุติขึ้นมาที่บริเวณฝ่ามือเพื่อใช้สำหรับคำนวณ และโดยทั่วไปแล้วเส้นโค้งชนิด Bezier จะเกิดจากเส้นตรงเส้นเล็กๆจำนวนมากมาประกอบกันเป็นเส้นโค้ง ดังนั้น จุดที่เกิดการชนกันสามารถคำนวณหาได้โดยใช้ทฤษฎี line segment-sphere intersection ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.8 แสดงการคำนวณโดยใช้ line segment-sphere intersection

จากรูปที่ 2.8 จุด  $P$  เป็นจุดใดๆ บนเส้นตรงที่ถูกกำหนดโดย จุด  $P_1 (x_1, y_1, z_1)$  และ  $P_2 (x_2, y_2, z_2)$  ดังนี้

$$P = P_1 + u(P_2 - P_1) \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทรงกลมมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $P_3(x_3, y_3, z_3)$  และมีรัศมี  $r$  เขียนเป็นสมการทรงกลมได้ดังนี้

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = r^2 \quad (2.6)$$

ซึ่งสมการเส้นตรงบนทรงกลมเขียนได้ในรูปของสมการพีชคณิตกำลังสองดังนี้

$$au^2 + bu + c = 0 \quad (2.7)$$

ดังนั้น

$$a = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$$

$$b = 2[(x_2 - x_1)(x_1 - x_3) + (y_2 - y_1)(y_1 - y_3) + (z_2 - z_1)(z_1 - z_3)]$$

$$c = x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - 2[x_3 x_1 + y_3 y_1 + z_3 z_1] - r^2$$

จากการแก้สมการพีชคณิตกำลังสอง จะสามารถคำนวณหาผลลัพธ์ได้โดย

$$u = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

เมื่อพิจารณา เทอมของ  $b^2 - 4ac$  จะได้ว่า

ถ้า  $b^2 - 4ac < 0$  แสดงว่าเส้นตรงและทรงกลม ไม่ชนกัน

ถ้า  $b^2 - 4ac = 0$  แสดงว่าเส้นตรงเป็นเส้นสัมผัสทรงกลม

และถ้า  $b^2 - 4ac > 0$  แสดงว่าเส้นตรงตัดผ่านทรงกลม

### 2.2.2 Bezier Curve Fragmentation

ในการแบ่ง Bezier curve ออกเป็น 2 ส่วนสามารถทำได้โดยใช้ De Casteljau's algorithm ซึ่งอัลกอริทึมนี้ถูกพัฒนาโดย Paul de Casteljau เพื่อใช้สำหรับแบ่งสมการโพลิโนเมียลที่อยู่ในรูปของ Bernstein Form ดังที่แสดงในสมการที่ 2.4 ออกเป็น 2 สมการย่อย

$$B(t) = \sum_{i=0}^n \beta_i b_{i,n}(t) \quad (2.8)$$

ซึ่งสามารถ แสดงในรูปของ recurrence relation ได้ดังต่อไปนี้

$$\beta_i^{(0)} = \beta_i, i = 0, \dots, n \quad (2.9)$$

$$\beta_i^{(j)} = \beta_i^{(j-1)}(1 - t_0) + \beta_{i+1}^{(j-1)}t_0, i = 0, \dots, n - j, j = 1, \dots, n \quad (2.10)$$

และ

$$B(t_0) = \beta_0^{(n)} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจาก De Casteljau's algorithm จะได้ว่า

$$B(t) = \sum_{i=0}^n \beta_i^{(0)} b_{i,n}(t), \in [0,1] \quad (2.12)$$

จะแบ่งได้เป็น

$$B_1(t) = \sum_{i=0}^n \beta_0^{(i)} b_{i,n}\left(\frac{t}{t_0}\right), \in [0, t_0] \quad (2.13)$$

และ

$$B_2(t) = \sum_{i=0}^n \beta_{n-1}^{(i)} b_{i,n}\left(\frac{t-t_0}{1-t_0}\right), \in [t_0, 1] \quad (2.14)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบและพัฒนาโมเดลจำลองการแตกหักของหินปูน

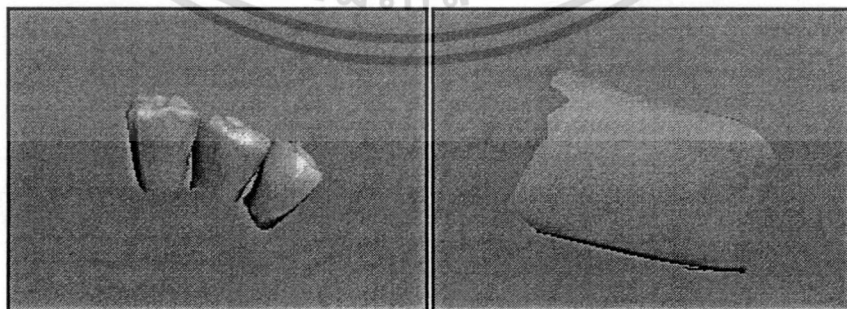
โครงการนี้เป็นการสร้างโปรแกรมจำลองการฝึกหัดการชูดหินปูนให้แก่นักศึกษาทันตแพทย์ ซึ่งโปรแกรมจะประกอบไปด้วยการสร้างโมเดลของฟัน เหงือก และหินปูน รวมทั้งการจำลองแรงต้านเมื่อใช้เครื่องมือชูดหินปูนกับวัตถุต่างๆ และการคำนวณหาแรงที่กระจายไปยังส่วนต่างๆ ของหินปูน ขณะทำการชูด

#### 3.1 การโมเดลของฟัน เหงือก และหินปูน

การจำลองการชูดหินปูนจะประกอบไปด้วยการสร้างโมเดลของฟัน เหงือก และหินปูน โดยแต่ละโมเดลจะมีรูปร่าง และคุณสมบัติของพื้นผิว (Haptic property) เมื่อเราสัมผัสที่แตกต่างกัน ซึ่งได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของพื้นผิว (Stiffness :  $k$ ) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพื้นผิวนั้นๆ (Friction :  $\mu$ ) โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะประกอบไปด้วย ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต (Static :  $\mu_s$ ) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ (Dynamic :  $\mu_d$ )

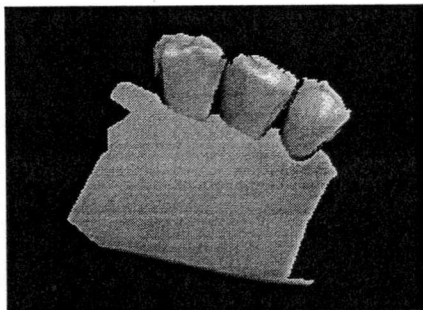
##### 3.1.1 การสร้างโมเดลฟันและเหงือก

ฟันและเหงือกจะถูกสร้างโดยโปรแกรมสร้างวัตถุ 3 มิติ แล้วนำโมเดลนี้ไหลดเข้าสู่โปรแกรม โดยจะมีค่าคุณสมบัติของพื้นผิวของฟันคือ  $k = 1.0$ ,  $\mu_s = 0.2$  และ  $\mu_d = 0.1$  ส่วนค่าคุณสมบัติของเหงือก คือ  $k = 0.6$ ,  $\mu_s = 0.0$  และ  $\mu_d = 0.0$



รูปที่ 3.1 โมเดลของฟันและเหงือกที่สร้างขึ้นจากโปรแกรมสร้างวัตถุ 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 โมเดลพื้นและเชิงอกขณะจำลองการขูดหินปูน

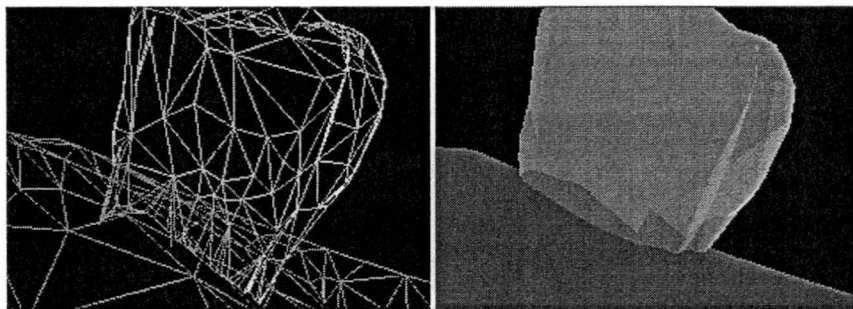
### 3.1.2 การสร้างโมเดลหินปูน

การสร้างโมเดลหินปูนจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือ ส่วนกราฟิก (Graphical model) สำหรับสร้างรูปร่างหินปูนที่เรามองเห็นและการจำลองแรงสัมผัส ส่วนที่สองคือ ส่วนกายภาพ (Physical model) สำหรับการจำลองการแตกของหินปูน

#### 3.1.2.1 ส่วนกราฟิก

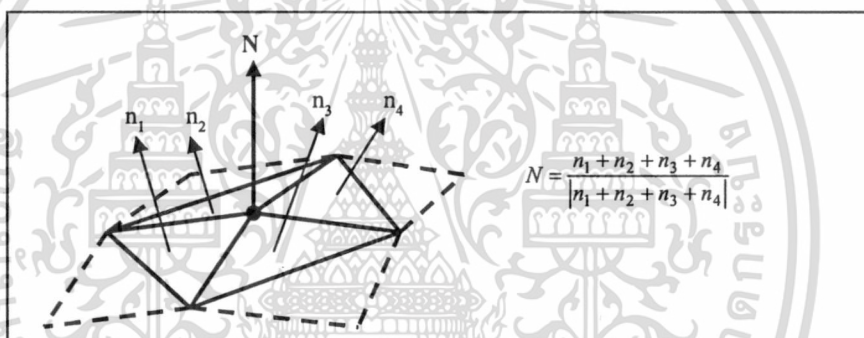
โมเดลพื้นและเชิงอกจะประกอบไปด้วยโพลีกอนสามเหลี่ยม (Triangle polygon) เล็กๆ เชื่อมต่อกันเป็นรูปร่างของพื้นและเชิงอก เมื่อนำโมเดลของพื้นและเชิงอกมาประกอบกันจะเกิดการตัดกัน (Intersection) ของโพลีกอนทั้งสองโมเดล ซึ่งก็คือบริเวณขอบเชิงอกกับพื้นนั่นเอง ซึ่งโพลีกอน บริเวณนี้ จะถูกนำไปสร้างเป็นโพลีกอนของหินปูนต่อไป โพลีกอนของหินปูนจะถูกสร้างจากนอร์มอล เวกเตอร์ (Normal vector) ของจุดมุมของโพลีกอนของพื้น โดยจุดมุมของโพลีกอนของหินปูนที่สร้างขึ้นมา จะอยู่ในแนวของนอร์มอล เวกเตอร์ของจุดมุมของพื้น ซึ่งจะเป็นไปตามอัลกอริทึมดังต่อไปนี้

- 1) หาโพลีกอนของพื้นทั้งหมดที่ตัดกับโพลีกอนของเชิงอก (ดูรายละเอียดได้ตามเอกสารอ้างอิงที่ 5)
- 2) ใช้ฟังก์ชัน stochastic ในการสุ่มเลือกโพลีกอนของพื้นที่จะถูกนำไปสร้างเป็นหินปูน



รูปที่ 3.3 โพลีกอนที่ตัดกันระหว่างพื้นกับเหงือก

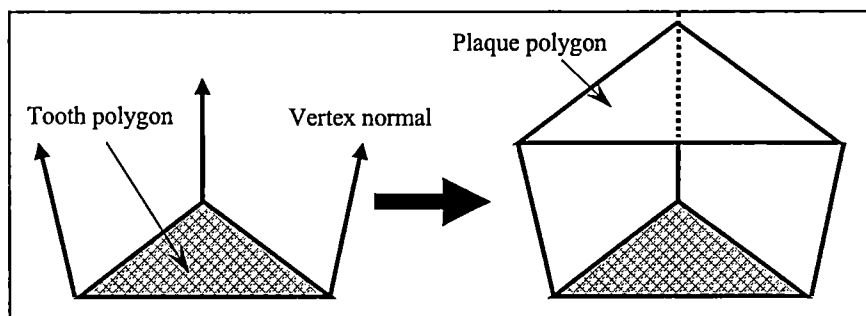
- 3) จากจุดมุมของโพลีกอนของพื้นที่ถูกเลือก เราจะหาค่านอร์มอล เวกเตอร์ ของแต่ละจุด โดยใช้วิธีหาค่าเฉลี่ยจากนอร์มอล เวกเตอร์ของโพลีกอนข้างเคียง (ดังรูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 วิธีการหาค่านอร์มอล เวกเตอร์ ของแต่ละจุดมุม

- 4) จุดมุมของโพลีกอนของหินปูนจะถูกสร้างโดยการเลื่อนจุดมุมของโพลีกอนของพื้นไปตามนอร์มอล เวกเตอร์ของตัวเอง
- 5) สร้างโพลีกอนของหินปูนและโพลีกอนที่เชื่อมต่อกับหินปูนกับพื้นเข้าด้วยกันจากจุดมุมเหล่านี้ (ดังรูปที่ 3.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การสร้างโมเดลหินปูน

### 3.1.2.2 ส่วนกายภาพ

เราจะใช้ระบบของจุดมวล (Point-mass) แทนชิ้นส่วนเล็กๆ ของหินปูนและฟัน ซึ่งจะถูกวางอยู่ในตำแหน่งตรงกลางของโพลีกอนของหินปูนและฟัน (แทนด้วยสี่เหลี่ยม ในรูปที่ 3.6) วิธีการหาจุดตรงกลางของสามเหลี่ยม หรือจุด centroid เป็นไปดังสมการข้างล่าง

$$g = 1/3 (a + b + c) \quad (1)$$

โดยที่  $g$  คือ จุด centroid ของสามเหลี่ยม

$a, b, c$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของจุดมุมของสามเหลี่ยมที่ต้องการหา centroid

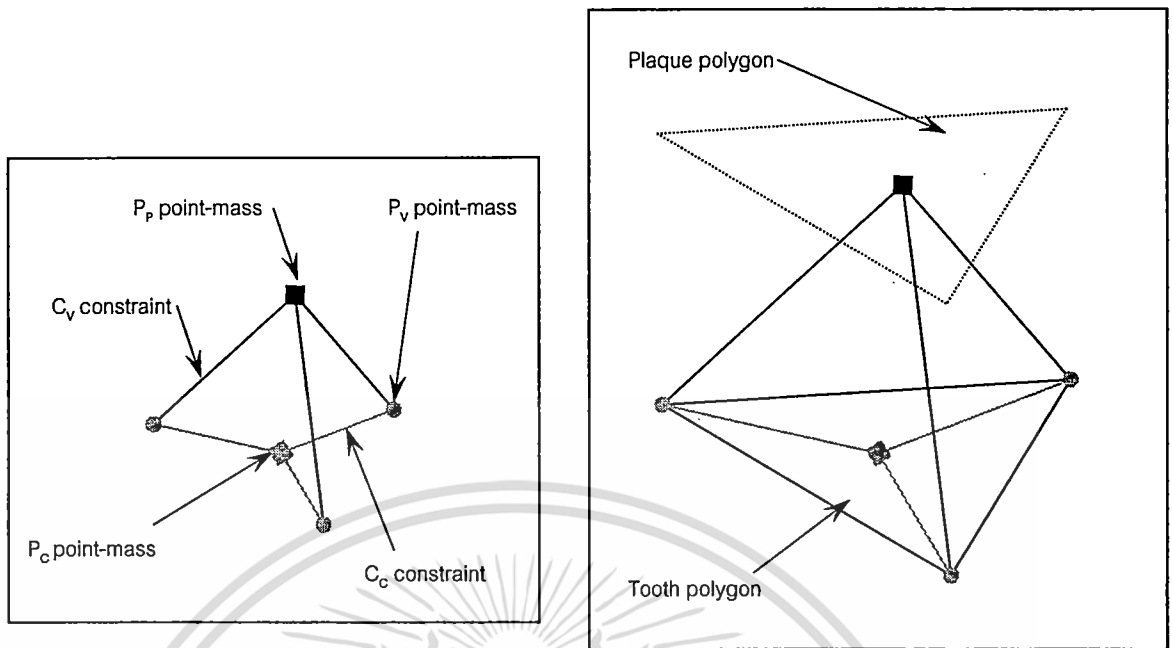
นอกจากนี้ จะสร้างจุดมวลที่ตำแหน่งของมุมของโพลีกอนของฟันที่ถูกใช้ในการสร้างโพลีกอนหินปูนด้วย เพื่อที่จะได้นำไปสร้างจุดเชื่อมต่อกันระหว่างหินปูนและฟันต่อไป (แทนด้วยจุดสี่เทา ในรูปที่ 3.6) จุดมวลเหล่านี้จะถูกเชื่อมต่อกันด้วยตัวยึด (bond) เรียกว่า "rigid-constraint" ซึ่งเป็นข้อกำหนดหรือตัวบังคับให้วัตถุมีสภาพคงรูปเป็นของแข็ง (แทนด้วยเส้น ในรูปที่ 3.6) constraint นี้ จะถูกแบ่งเป็น 3 แบบ คือ  $C_c, C_v$  and  $C_p$  constraints

#### a. $C_c$ constraint

Constraint นี้ เชื่อมต่อจุดมวลที่มุมของโพลีกอนของฟัน ( $P_v$ ) กับจุดมวลที่อยู่ตรงกลางของโพลีกอนของฟัน ( $P_c$ ) เข้าด้วยกัน (แทนด้วยเส้นสี่เทาในรูปที่ 3.6)

#### b. $C_v$ constraint

แต่ละจุดมวลของหินปูน ( $P_p$ ) จะสร้าง constraint นี้เชื่อมต่อไปยังจุดมวลของฟันที่อยู่ในตำแหน่งจุดมุมของโพลีกอนของฟันทั้ง 3 จุด

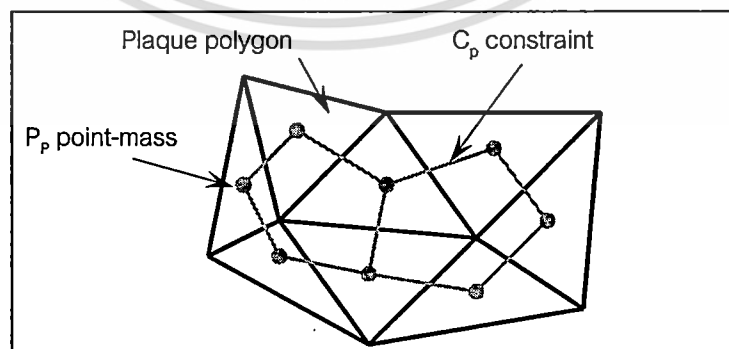


รูปที่ 3.6  $C_c$ ,  $C_v$  and  $C_p$  constraints

c.  $C_p$  constraint

สำหรับโมเดลของหินปูน constraint นี้เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างจุดมวลของโพลีกอนหินปูนกับจุดมวลของโพลีกอนข้างเคียงเข้าด้วยกัน (แทนด้วยเส้นสีเทาในรูปที่ 3.7)

ค่ามวลของแต่ละจุดมวลกำหนดโดยปริมาตรของแต่ละชั้นของหินปูนและค่าความหนาแน่นของหินปูน และค่ามวลของจุดมวลของพื้นนั้น เราจะกำหนดให้มีค่ามากกว่าจุดมวลของหินปูนประมาณ 20 เท่า เพื่อให้หินปูนไม่มีการเคลื่อนที่เมื่อมีแรงมากระทำ ส่วนค่าของแรงยึดเกาะ (Bond's strength) ระหว่างกันของแต่ละชั้นของหินปูนนั้นก็จะมีค่าแตกต่างกันโดยอาศัยฟังก์ชันการสุ่มของ noise and turbulence function (เอกสารอ้างอิงที่ 6) ซึ่งค่าแรงยึดเกาะนี้จะเป็นตัวที่ว่าส่วนไหนของหินปูนจะแตก เมื่อมีแรงมากระทำ



รูปที่ 3.7  $P_p$  constraints

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ในการสร้างโมเดลส่วนกราฟิก จะใช้ OpenGL สำหรับสร้างโพลีกอนหรือรูปร่างของหินปูน และส่วนกายภาพนั้นสำหรับจำลองการกระจายของแรง เพื่อพิจารณาการแตกของหินปูน ในการสร้างโมเดลหินปูนนี้ เรากำหนดให้มีค่าคุณสมบัติของพื้นผิวคือ  $k = 0.9$ ,  $\mu_s = 0.6$  และ  $\mu_d = 0.4$

### 3.2 การจำลองการขูดหินปูน

การจำลองการขูดหินปูนถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือ การจำลองแรง โดยใช้สปริงโมเดล คำนวณหาแรงต้านที่เกิดขึ้นเมื่อเรากระทำกับวัตถุต่างๆ โดยสัมพันธ์กับจุดปลายของอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส ส่วนที่สองคือ การจำลองการแตกของหินปูน

#### 3.2.1 การจำลองแรง

แรงต้านที่เกิดขึ้นเมื่อสัมผัสวัตถุเกิดจากการรวมกันของ แรงกดจากมือของผู้ใช้ และแรงจากการสั่นของเครื่องมือจำลองการขูดหินปูน และแรงทั้งสองส่วนนี้จะถูกนำไปใช้ป้อนให้กับจุดมวล ในโครงสร้างของหินปูนด้วย

##### 3.2.1.1 แรงกดจากมือผู้ใช้

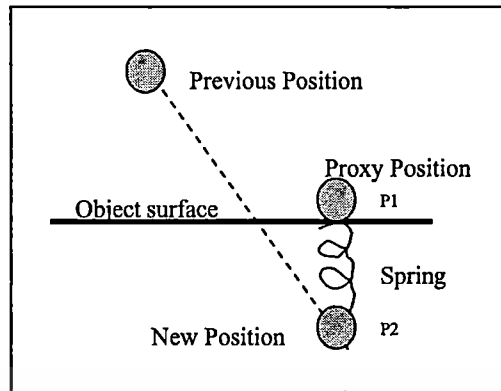
แรงกดนี้ คำนวณจากระยะห่างจากจุดปลายของเครื่องมือขูดหินปูนเสมือนกับพื้นผิวของวัตถุ เมื่อเครื่องมือขูดหินปูนเข้าไปในเนื้อของวัตถุ โดยอาศัยหลักการของ Hooke's law

$$F_s = k(p_2 - p_1) \quad (2)$$

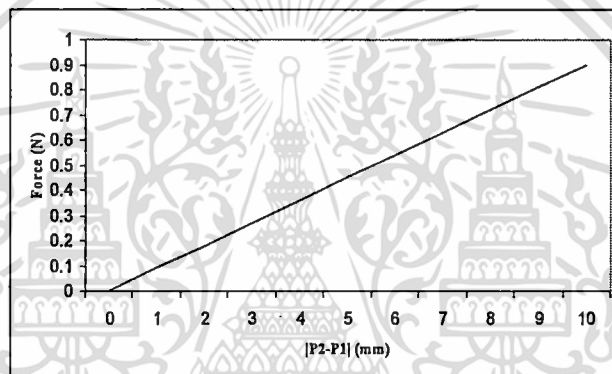
จากสมการข้างบน  $k$  คือค่าความแข็งของพื้นผิววัตถุ,  $p_2$  คือตำแหน่งปัจจุบันของจุดปลายของอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส และ  $p_1$  คือจุดบนพื้นผิวของวัตถุที่มีระยะทางสั้นที่สุดเมื่อวัดจาก  $p_2$

83642

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 การคำนวณแรงกด



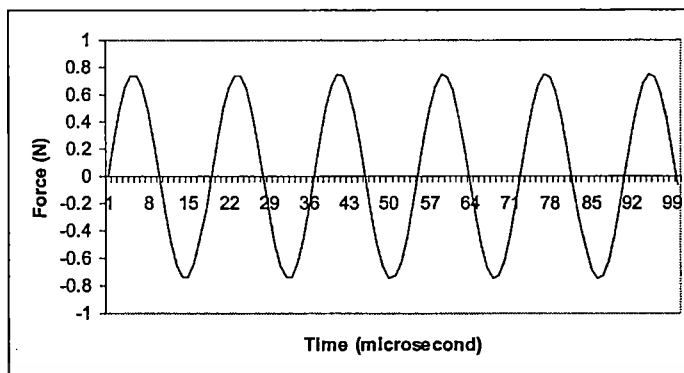
รูปที่ 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะทางในการกด

### 3.2.1.2 แรงสั่น

เกิดจากเครื่องมือสำหรับชูดหินปูน เพื่อให้การชูดทำได้เร็วขึ้น ซึ่งแรงสั่นคำนวณได้จากสมการข้างล่าง

$$F_v(t) = a * \sin(\tau * t * f) \quad (3)$$

จากสมการข้างบน  $a$  คือ แอมพลิจูด (amplitude) ของการสั่น,  $t$  คือ เวลา,  $\tau$  คือ คาบเวลาการทำงานของอุปกรณ์จำลองแรงสั่นผัส (เท่ากับ 1ms) และ  $f$  ความถี่ของการสั่น (frequency)



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงสั่นกับเวลา

### 3.2.2 การจำลองการแตก

หินปูนที่สร้างจะมีโครงสร้างเป็นจุดมวลเชื่อมต่อกันด้วย rigid-constraint โดยแรงที่กระทำกับหินปูนนี้จะกระทำผ่านจุดมวลและกระจายไปยังจุดมวลอื่นๆ ทั้งวัตถุ การคำนวณแรงที่กระจายไปยังส่วนต่างๆ ของวัตถุเราอาศัยวิธีการของ Lagrange multipliers ซึ่งเป็นไปดังสมการข้างล่าง

$$\mathbf{J}\mathbf{W}\mathbf{J}^T\lambda = -\mathbf{J}\mathbf{W}\mathbf{q}^T \quad (4)$$

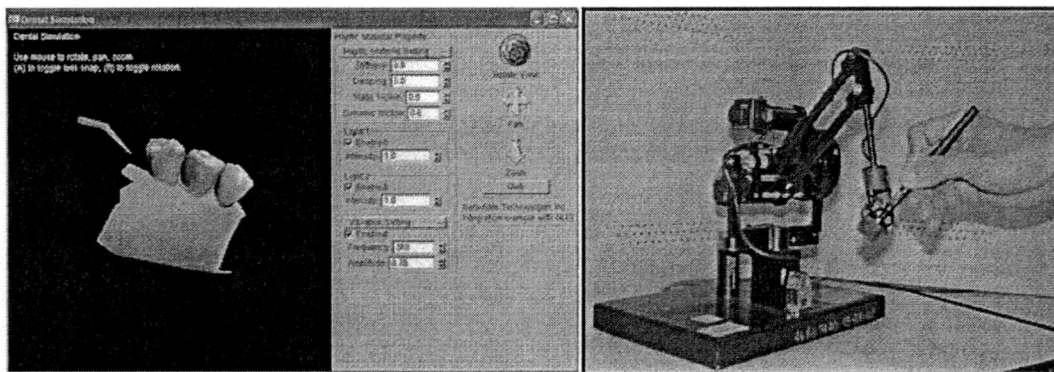
จากสมการข้างบน เวกเตอร์  $\lambda$  คือ ตัวคูณ (multipliers) ซึ่งเป็นตัวที่เราต้องคำนวณหาค่า,  $\mathbf{W}$  คือ inverse matrix ของมวล,  $\mathbf{q}$  คือ เวกเตอร์ของแรงที่กระทำกับจุดมวลทั้งหมด และ  $\mathbf{J}$  คือ Jacobian matrix ของ matrix  $\mathbf{c}$  (rigid constraint) กำหนดโดย

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{c}}{\partial \mathbf{p}} \quad (5)$$

โดย  $\mathbf{p}$  คือ เวกเตอร์แสดงตำแหน่งของจุดมวล และแต่ละแถวของ  $\mathbf{J}$  คือ อนุพันธ์ของ constraint  $\mathbf{c}$  เทียบกับตำแหน่งของจุดมวล

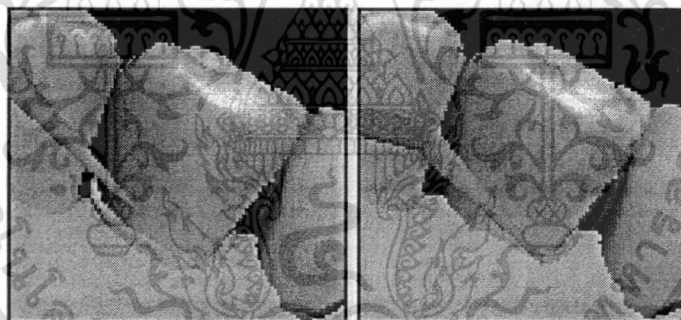
### 3.3 ผลการดำเนินงานวิจัยและพัฒนา

จากการศึกษา ออกแบบ และพัฒนาโปรแกรมสำหรับจำลองการชูดหินปูนด้วยอุปกรณ์จำลองแรงสัมผัส ได้เขียนโปรแกรมซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 โปรแกรมสำหรับจำลองการชุดหินปูนด้วยอุปกรณ์จำลองแรงสั่นผัด

เมื่อเปิดโปรแกรมจะมีตัวควบคุมอยู่ทางขวามือ สำหรับปรับเปลี่ยนคุณสมบัติพื้นผิวของพื้น การปรับเปลี่ยนความเข้มของแสง การปรับความแรงการสั่นของอุปกรณ์ โดยปรับค่า amplitude และ frequency นอกจากนี้ ผู้ใช้ยังสามารถปรับเปลี่ยนมุมมองของตัวพื้นได้ ทั้งการหมุน การย้ายตำแหน่ง และการซูมเข้าหรือออก



รูปที่ 3.12 ขณะทำการชุดหินปูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การศึกษาและพัฒนาเทคนิคการจำลองวัตถุ 3 มิติโดยใช้แบบจำลอง ทางกายภาพเทียม

โครงการนี้เป็นระบบการสร้างโปรแกรมจำลองการปรับเปลี่ยนรูปทรงสามมิติโดยใช้โครงสร้างพื้นฐานของเส้นโค้งชนิด Bezier รวมไปถึงการคำนวณหา Collision Detection ระหว่างเส้นโค้งกับมือที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนรูปทรง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 Gesture-based Direct Manipulation of a Bezier curve

เส้นโค้ง Bezier เป็นเส้นโค้งที่สร้างขึ้นโดยมีจุด Control Point เป็นจุดที่กำหนดรูปร่างและลักษณะของเส้นโค้ง ซึ่ง Bezier สามารถ มี Control Point ตั้งแต่ 3 จุดขึ้นไป แต่โดยทั่วไปนิยมใช้ Control Point 4 จุด โดยเรียก Bezier ชนิดที่มีจุด Control Point 4 จุดว่า Cubic Bezier Curve โดยที่ Bezier จะสามารถคำนวณได้ตามสมการที่(1) ดังต่อไปนี้

$$C(t) = (1-t)^3 P_0 + 3t(1-t)^2 P_1 + 3t^2 (1-t) P_2 + t^3 P_3 \quad (4.1)$$

โดยที่  $P_0, P_1, P_2, P_3$  คือ Control Point ทั้ง 4 จุดของ Bezier แต่ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาโดยใช้พื้นฐานของมือมนุษย์เป็นหลัก ดังนั้นเมื่อเปรียบโครงสร้างของเส้นโค้งชนิด Bezier กับมือของมนุษย์แล้ว จะสังเกตเห็นความคล้ายคลึงกัน ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงเปรียบเทียบความคล้ายคลึงกันของเส้นโค้งชนิด Bezier กับการปรับเปลี่ยนรูปทรง  
โดยใช้มือของมนุษย์

จากสมการที่ (4.1) สามารถเปลี่ยนรูปได้ใหม่ดังต่อไปนี้

$$C(t) = (t-1)^2(2t-1)P_0 + 3t(1-t)^2 \alpha V_1 + 3t^2 (1-t)\beta V_2 + t^3(3-2t)P_3 \quad (4.2)$$

โดยที่  $V_1$  และ  $V_2$  คือเวกเตอร์ทิศทาง และ  $\alpha$  และ  $\beta$  เป็นพารามิเตอร์ควบคุมสำหรับ pseudo-physical

## 4.2 Physical constraints

เป็นข้อกำหนดทางกายภาพซึ่งเกิดจากการเรียนแบบคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุในโลกแห่งความเป็นจริงมีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่

1. Length constraint เป็นข้อกำหนดเพื่อจำกัดความยาวว่าสามารถเปลี่ยนแปลงไปจาก ความยาวดั้งเดิมได้มากน้อยเพียงใด ยกตัวอย่างเช่น เส้นลวดแข็งจะมีค่า Length constraint สูงทำให้เมื่อมีการงอเส้นลวดจึงเกิดการหักมุมตามแรงที่มากระทำ เป็นต้น
2. Bending constraint เป็นข้อกำหนดเพื่อจำกัดการโค้งงอของวัตถุว่าสามารถโค้งงอได้ มากน้อยเพียงใด ยกตัวอย่างเช่น เส้นเชือกมี Bending constraint มากกว่า เมื่อมีการงอ จะทำให้เส้นเชือกเกิดการโค้งงอขึ้นตามแรงที่มากระทำ แต่จะไม่มีเกิดการหักมุม เป็นต้น

## 4.3 การจำลองเชิงกายภาพเทียม (pseudo-physical simulation)

เทคนิคการจำลองเชิงกายภาพนี้เป็นการจำลองคุณสมบัติของวัตถุเสมือนสามมิติให้มี คุณสมบัติใกล้เคียงกับวัตถุจริงในธรรมชาติ ซึ่งเทคนิคนี้ไม่ได้นำกฎทางฟิสิกส์มาใช้คำนวณ แต่จะ ใช้ข้อกำหนดความยาว และความโค้ง ที่ได้กล่าวในบทก่อนหน้า มาใช้แทน ซึ่งเทคนิคนี้ จะมีการ เพิ่มพารามิเตอร์ 2 ตัว เข้าไปเพื่อใช้ในการถ่วงน้ำหนักคุณสมบัติระหว่างความยาวและความโค้ง ของวัตถุเสมือนสามมิติ ซึ่งจะคำนวณโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$C = w_1 M + w_2 \Delta L \quad (4.6)$$

โดยที่  $C$  คือค่า cost ที่เกิดขึ้นซึ่งต้องมีค่าน้อยที่สุด

$w_1$  และ  $w_2$  คือพารามิเตอร์ที่ถูกกำหนดขึ้น

$M$  คือ ค่าความโค้งของเส้นโค้ง Bezier

และ  $\Delta L$  คือค่าความยาวของเส้นโค้งที่ถูก normalize แล้ว โดยคำนวณได้ดังนี้

$$\Delta L = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (4.7)$$

$L$  คือความยาวของเส้นโค้ง Bezier ที่คำนวณได้

$L_0$  คือค่าความยาวเดิมโดยคำนวณจากระยะห่างระหว่าง Control Point  $P_0$  และ  $P_3$

สามารถนำไปเขียนเป็นอัลกอริทึมได้ดังต่อไปนี้

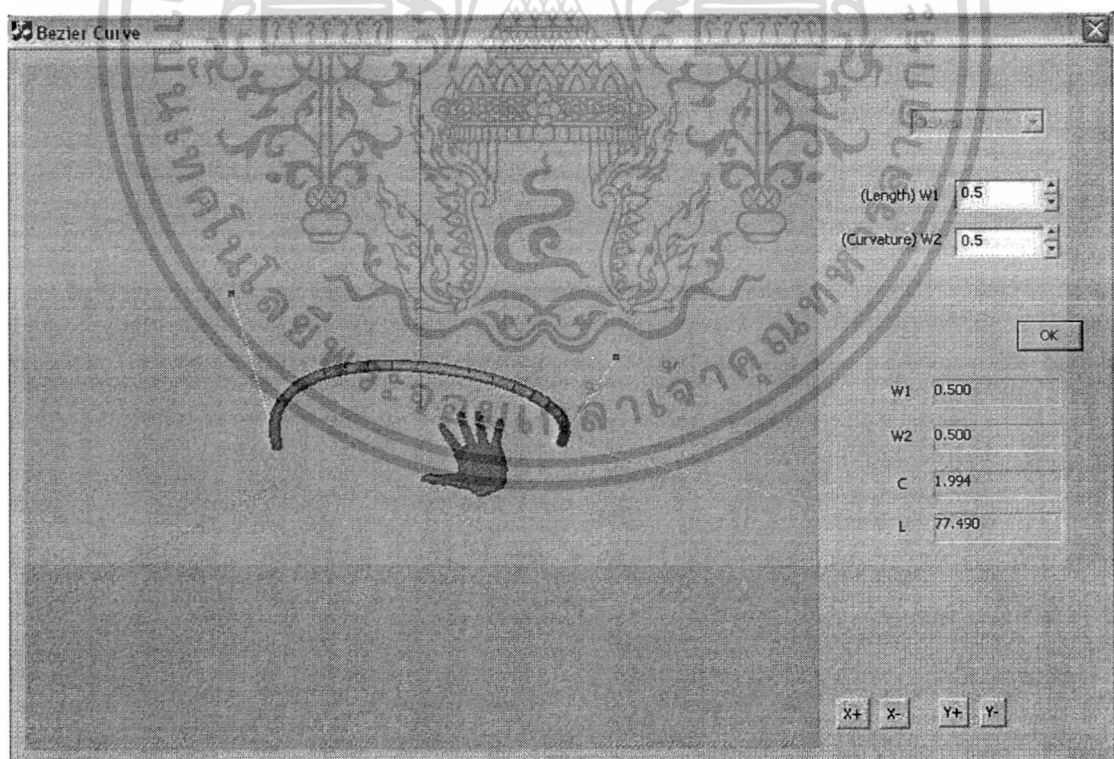
```

While C is not minimal do
    Decrease  $\alpha$  and  $\beta$ 
    Calculate new Length where new  $\alpha$  and  $\beta$ 
    Calculate new C
End while loop
  
```

รูปที่ 4.2 แสดงอัลกอริทึมสำหรับการจำลองเชิงกายภาพเทียมไปใช้

#### 4.4 ผลการดำเนินงานวิจัยและพัฒนา

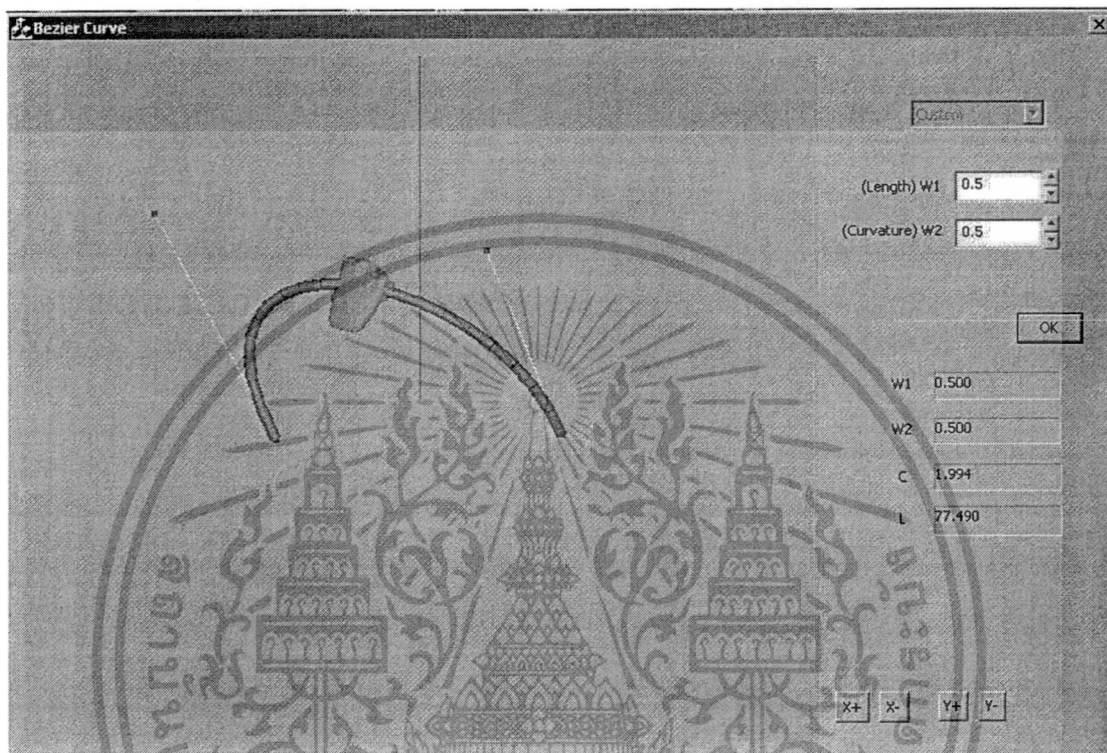
จากการศึกษา ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมสำหรับ Pseudo-Physical Simulation ได้แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 โปรแกรมจำลองการปรับเปลี่ยนรูปทรงวัตถุโดยใช้ Pseudo-Physical Simulation

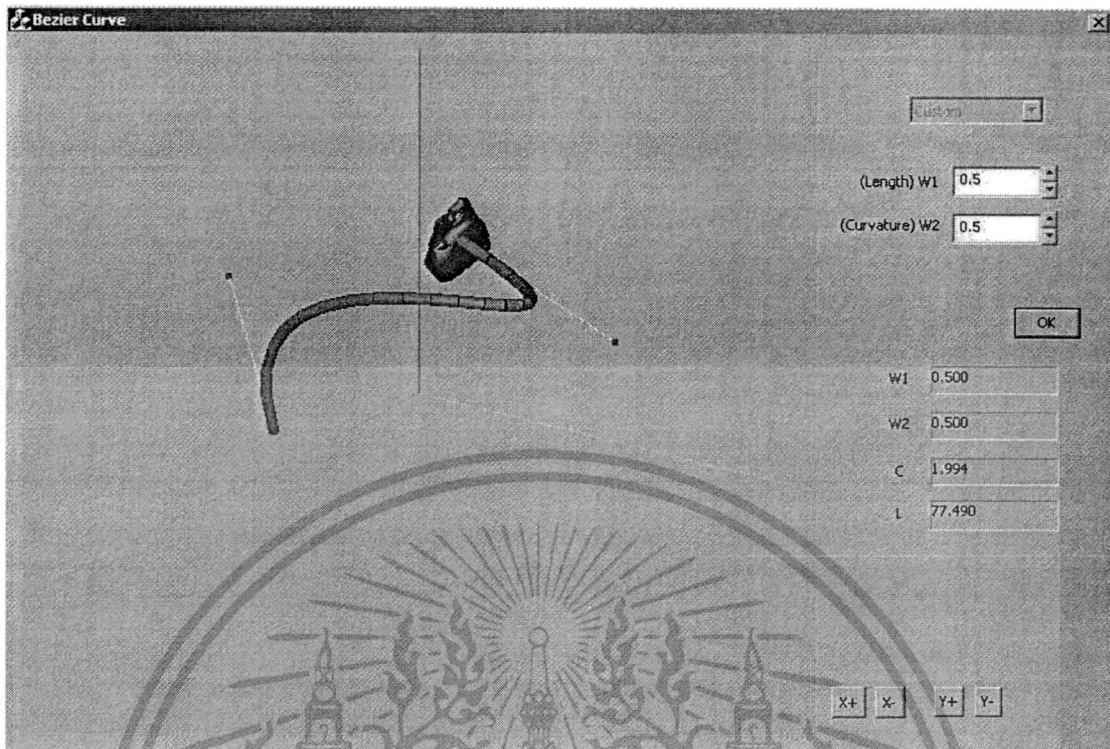
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม ค่าที่แสดงเป็นค่าเริ่มต้นของโปรแกรมที่ได้ตั้งเอาไว้ โดยที่ค่า default ของ  $w_1$  และ  $w_2$  คือ 0.5 และ 0.5 ตามลำดับ ซึ่งผู้ใช้สามารถที่จะแก้ไขค่าของ  $w_1$  และ  $w_2$  ได้ตามต้องการ



รูปที่ 4.4 โปรแกรมจำลองการปรับเปลี่ยนรูปทรงวัตถุโดยใช้ Pseudo-Physical Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 โปรแกรมจำลองการปรับเปลี่ยนรูปทรงวัตถุโดยใช้ Pseudo-Physical Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัยและพัฒนา

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

งานวิจัยในส่วนแรก โปรแกรมจำลองการชูดหินปูนที่พัฒนาขึ้นมาสามารถนำไปใช้ฝึกฝนนักศึกษาทันตแพทย์ เพื่อเพิ่มทักษะความชำนาญเกี่ยวกับการชูดหินปูนมากขึ้น จากผลการทดลองในบทที่ 3 สามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการดำเนินโครงการได้ ดังนี้

##### 5.1.1 ความละเอียดของโมเดล

ความละเอียดของโมเดลของฟัน เหงือก และหินปูน นั้นคือจำนวนโพลีกอนของแต่ละโมเดล ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความเร็วของโปรแกรม ทั้งการแสดงผลโมเดลและการคำนวณการแตกของหินปูน ยิ่งโมเดลมีความละเอียดมากเท่าไร การแสดงผลแบบ real-time ก็ยิ่งช้าลงเท่านั้น

##### 5.1.2 การคำนวณค่าทางคณิตศาสตร์

การคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในโปรแกรมส่วนใหญ่คือการคำนวณเมตริกซ์ ไม่ว่าจะเป็นการคูณ หรือ การหาค่า Inverse Matrix เพื่อแก้สมการ Lagrange multiplier เพื่อหาค่าการกระจายของแรงไปยังจุดมวลต่างๆ การทำงานของอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรมทำงานได้ดีในระดับหนึ่ง แต่ถ้าจุดมวล และ constraint เพิ่มมากขึ้นเป็นจำนวนมากๆ ก็จะมีผลต่อความเร็วในการคำนวณเมตริกซ์

งานวิจัยย่อยที่สอง สำหรับเทคนิคการจำลองวัตถุ 3 มิติโดยใช้การจำลองทางกายภาพ เที่ยมนี้อาจนำไปใช้ในการสร้างวัตถุเสมือน 3 มิติให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับวัตถุจริงธรรมชาติ แต่ก็ยังความยืดหยุ่นของการเป็นวัตถุเสมือน 3 มิติเอาไว้ ทำให้สามารถช่วยอำนวยความสะดวกในการสร้างวัตถุเสมือน 3 มิติ และลดความซับซ้อนในการสร้างวัตถุเสมือนลงได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยในส่วนแรก สามารถนำไปปรับปรุงและพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้งานได้อีกมากมายทางด้านทันตกรรม ไม่ว่าจะเป็นจำลองการอุดฟัน กรอฟัน หรือการผ่าตัดในช่องปาก และการออกแบบเครื่องมือทางทันตกรรมที่มีความสมจริงและหลากหลายมากขึ้น

งานวิจัยย่อยที่สอง สามารถนำเทคนิคที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้กับเทคนิคอื่นๆ ได้ เช่น นำไปประยุกต์ใช้กับ Skeleton เพื่อทำให้การสร้างวัตถุเสมือน 3 มิติ มีความใกล้เคียงวัตถุจริงในธรรมชาติมากยิ่งขึ้นได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] K.S. Choi, H. Sun, PA Heng, JCY Cheng, "A Scalable Force Propagation Approach for Web-based Deformable Simulation of Sift Tissues", Web3D 2002, p. 185-193, USA, 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, N.Chiba, "Crack pattern simulation based on 3D surface cellular automata", *The Visual Computer*, Vol.17, 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] T. Moller. "A Fast Triangle-Triangle Intersection Test," *J. Graphics Tools*, 2(2):25–30, 1997.
- [6] K. Perlin. "An image synthesizer," *SIGGRAPH 85Conf. Proceedings*, pp. 287–296, 1985.
- [7] D. Terzopoulos and K. Fleischer. "Modeling inelastic deformation: Viscoelasticity, plasticity, fracture," *In Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings)*, Vol. 22, pp. 269–278, August 1988.
- [8] A. Norton, G. Turk, B. Bacon, J. Gerth, and P. Sweeney. "Animation of fracture by physical modeling," *Visual Computing*, 7(4): pp. 210–219, 1991.
- [9] A. Witkin and D. Baraff, "Physically Based Modeling: Principles and Practice," *SIGGRAPH Course Notes, ACM SIGGRAPH*, 1997.
- [10] 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.
- [11] D. Terzopoulos and K. Fleischer. "Modeling inelastic deformation: Viscoelasticity, plasticity, fracture," *In Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings)*, Vol. 22, pp. 269–278, August 1988.
- [12] A.A. Griffith, "The Theory of Rupture," *The Proceedings of the First International Congress of Applied Mechanics*, 1924.

- [13] C. Ericson, "Real-Time Collision Detection," Morgan Kaufmann, USA, 2005
- [14] E. Angel, "Interactive Computer Graphics" (third edition), Addison-Wesley, 2000, ISBN 0-321-19044-0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Interactive Haptic Simulation of Dental Plaque Removal

Nontapol Somrang and Nopporn Chotikamthorn

Faculty of Information Technology and  
Research Center for Communications and Information Technology,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand  
Tel: +66-2-739-2429 ext. 3335, Fax: +66-2-739-2429

**Abstract**— This paper discusses the development of an interactive training system which performs haptic simulation for practicing dental plaque removal. Three object types are simulated, namely teeth, plaque, and gums. All of them can be interacted with through a single-point-of-contact haptic device. A tooth is modeled as a rigid-body object, while gums are modeled as a deformable object. A method has been developed for dental plaque simulation, based on a physically-based modeling of fragile material. Plaque is modeled as a set of point-masses connected by bonds which represent distance-preserving linear constraints. Some bonds are used to connect pieces of plaque together, while others are used to bind the plaque with teeth. The forces exerted on these bonds during impact are computed based on a spring-mass model of plaque object. The resulting force is compared with each bond strength to determine when and where plaque fragmentation occurs.

## I. INTRODUCTION

Dental training is made difficult by two factors. First, the need to use wasteful training material and expensive equipment make the training costly. This can also limit the number of practicing hours. Second, it is difficult, if possible, to train for a variety of patient cases. Development of a computer-based training system helps alleviate these problems. However, force reflective feedback is so crucial in such simulation. Therefore, a system requires a device that can give a haptic or force-reflective output. For this purpose, a single-point-of-contact force feedback device (such as the PHANTOM<sup>®</sup> used in this paper) can be used provide that needed simulation feedback.

Many types of training are required to fulfill the requirement for a college dentist degree. In this paper, the focus is on haptic simulation of dental plaque removal. Due to the nature of the plaque physical property, simulating the cracking of objects is required. An early attempt at modeling fracture is given in [1], where the authors presented a technique for modeling viscoelastic and plastic deformations. Their method used three fundamental metric tensors to define energy functions that measured deformation over curves, surfaces, and volumes. This method allowed them to demonstrate how certain fracture effects could be modeled by setting the elastic coefficients between adjacent nodes to zero whenever the distance between the nodes exceeded a

threshold. The method was applied to simulation of tearing cloth and paper.

In [2], Norton described a technique for modeling the breaking of three-dimensional objects. In their method, the object to be broken is subdivided into a set of equally sized cubes attached to one another with springs by their mass points. When the distance between two attached mass points exceeds a threshold, the spring connection is removed. In [3], continuum mechanics techniques developed in mechanical and civil engineering was applied to model flexible objects, which included crack initiation and propagation. This method is rather slow, however, due to a combination of high physical realism and a complex system for dynamically re-meshing the solid during simulation. In [4], Smith proposed a method for rapid and controllable simulation of brittle objects. They used a system of point-masses connected by workless, distance-preserving constraints to represent the object, instead of stiff springs. Its advantage is fast computation while still retaining control over the fracturing behavior. Lagrange Multipliers is used for solving exerted constraints forces.

In this paper, we developed an interactive dental training system for plaque removal. A physically-based simulation model for dental plaque based on the method in [4] is described. A method is developed to calculate an exerting force from a trainee hand through a haptic device.

## II. MODELING TEETH, GUMS AND PLAQUE

To perform the simulation, three objects are first modeled, namely teeth, gums and plaque. Each object differs in its shape and haptic property. The latter is described by such parameters as stiffness ( $k$ ) and friction ( $\mu$ ). Both static ( $\mu_s$ ) and dynamic ( $\mu_d$ ) frictions are modeled.

### A. Constructing Teeth Model

Teeth were initially constructed from a commercial 3D modeling tool. The resulting model was later imported to the program. Haptic material property of the teeth is modeled by setting the parameters as follows:  $k = 1.0$ ,  $\mu_s = 0.2$  and  $\mu_d = 0.1$ .

### B. Constructing Gums Model

A simple gums model was constructed from the same 3D authoring tool. Its haptic material property is modeled by setting the parameters as follows:  $k = 0.6$ ,  $\mu_s = 0.0$  and  $\mu_d = 0.0$ .

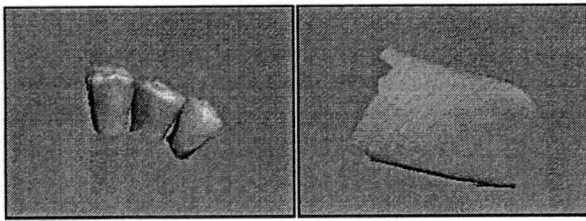


Fig. 1. Teeth and gums model used in the simulation

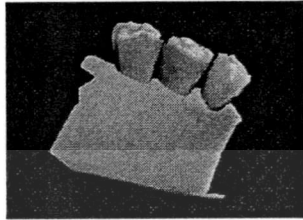


Fig. 2. Teeth and gums model as imported to the simulation program

### C. Constructing Plaque Model

Two different models are constructed for dental plaque. The first graphical model is for visualization and haptic simulation. The second physical model is for simulating the fragmentation.

#### 1. Graphical model

Plaque is graphically modeled by using vertex normal vectors of tooth polygon vertices to create plaque polygon vertices. The positions of these plaque polygons are slightly shift along the vertices' normal direction. Then, additional polygons are created to join the plaque with teeth. The algorithm used to create plaque polygons is described below.

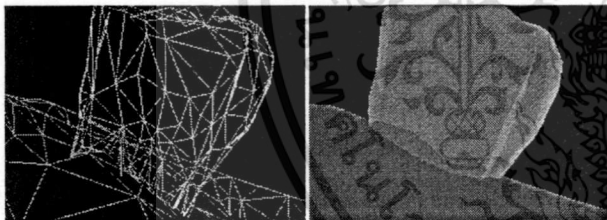


Fig. 3. Tooth – plaque polygons intersection

- 1) Find each tooth polygon which intersects with gum polygons [5].
- 2) By using a certain stochastic growth function, tooth polygons are chosen for plaque formation.
- 3) For each vertex of each chosen polygon, find its normal vector by averaging over all adjacent polygons' normal vectors (see Fig.4).
- 4) By slightly shifting the position of each chosen polygon vertex, form a plaque polygon which glues to that tooth's polygon (see Fig. 5).
- 5) Create plaque polygon from these new vertices.

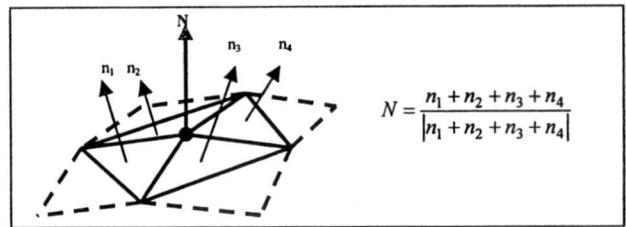


Fig. 4. Vertex normal vector

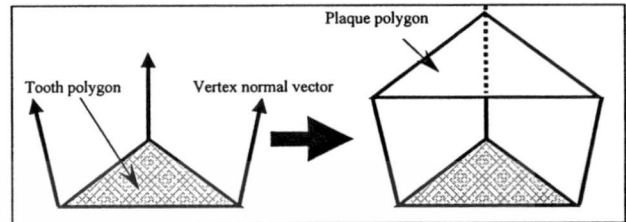


Fig. 5. Constructing a plaque model

#### 2. Physical model

A point mass model is assumed for both tooth and plaque. Each point mass position is located at the center of each polygon. The tooth physical model is composed of a set of point-masses at vertices of its polygons (denoted as grey dots in Fig. 6). In addition, a point mass is also added to a center of each polygon which forms a plaque model. Point-masses are interconnected by bonds representing rigid constraints (denoted as lines in Fig. 6). Three types of constraints are used, namely the tooth-tooth, tooth-plaque and plaque-plaque constraints.

##### a. Tooth-tooth constraint

This constraint, which is placed at the edge of the polygon, connects two adjacent tooth point-masses (denoted as black lines in Fig. 6).

##### b. Tooth-plaque constraint

Three constraints are created from a plaque point-mass to three tooth point-masses for connecting each plaque and tooth polygon pair together (denoted as grey lines in Fig. 6).

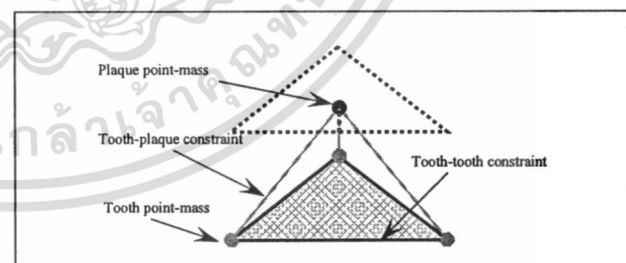


Fig. 6. Tooth-tooth and tooth-plaque constraints

##### c. Plaque-plaque constraint

For the plaque model, these constraints connect a point mass for each plaque polygon with those of the adjacent polygons (denoted as grey lines in Fig. 7).

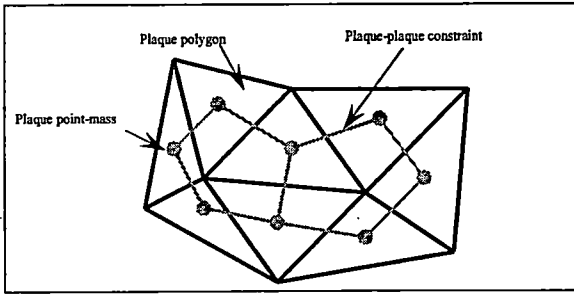


Fig. 7. Plaque-plaque constraints

The mass value of each point-mass is determined by the volume of the associated cube and the density of the object material. Each bond has its strength, which may differ from others'. A bond's strength indicates how much it can tolerate an exerting force before a break. Here, we adopted a noise and turbulence function [6] to set a bond's strength randomly. In addition, to ensure that the plaque do not move by an exerting force, weights of tooth point-masses are set to be significantly higher than ( $> 20$  times) those of the plaque point masses.

The graphical model is used by OpenGL to provide graphical representation of the plaque. The physical model is used to calculate haptic feedback, as well as to update the visual model when fragmentation occurs. Here, plaque's haptic material property is defined according to these parameter settings:  $k = 0.9$ ,  $\mu_s = 0.6$  and  $\mu_d = 0.4$ .

### III. SIMULATION TECHNIQUES

Simulation is performed in two parts. The first one deals with force simulation. This involves calculating an exerting force based on the location of the haptic device's end point. The resulting force is then used to calculate a feedback force. The second one deals with the simulation of plaque fragmentation.

#### A. Force Simulation

Force exerted on the model is a combination of a pressing force from a user hand and a vibrating force from a dental plaque removal tool (a dental drill). A combined force is also assumed to be exerted on a point mass.

##### 1. Hand pressing force

A force due to pressing of a user's hand on the teeth model is calculated from a distance between the haptic device's end point and the model surface. By using the spring-mass model, the hand pressing force is calculated from the following Hooke's law.

$$F_s = k(p_2 - p_1) \quad (1)$$

From the above equation,  $k$  is the surface stiffness,  $p_2$  is the real current position of the device end point and  $p_1$  is the shortest point on the surface of the model as measured from  $p_2$ .

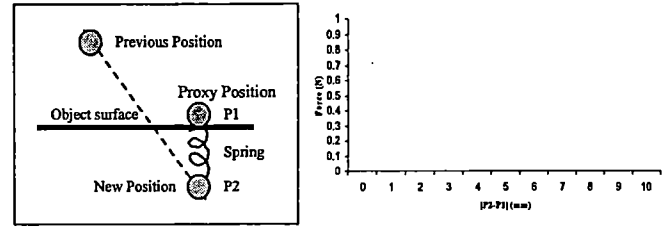


Fig. 8. Hand pressing force calculation based on a spring-mass model

##### 2. Vibration force

A vibrating force is generated by a plaque removal tool, to accelerate plaque fragmentation. The instantaneous amplitude of the force is calculated from the following equation

$$F_v(t) = a * \sin(\tau * t * f) \quad (2)$$

Here,  $a$  is an amplitude of vibration,  $t$  is the simulation time instance,  $\tau$  is the haptic simulation time interval (= 1ms in this case), and  $f$  is the vibration frequency.

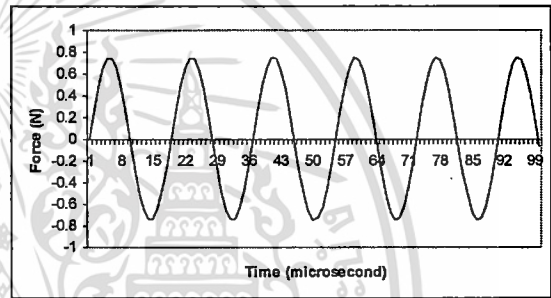


Fig. 9. Vibration force as a function of time

#### B. Fragmentation Simulation

We formulate the problem of calculating the reaction or constraint force due to rigid constraints as one of solving for Lagrange multipliers in the following simplification of constraint force.

$$JWJ^T \lambda = -JWq^T \quad (3)$$

The elements of the vector  $\lambda$  are the multipliers we wish to solve for, while  $W$  is the inverse mass matrix and  $q$  is the global force vector, containing information on what forces are being exerted on which point-mass. The Jacobian matrix  $J$  of the rigid constraint  $c$  is defined by

$$J = \frac{\partial c}{\partial p} \quad (4)$$

Where  $p$  is a vector of point-mass positions. Each row of  $J$  is the derivative of the constraint  $c$  with respect to the position of each point-mass.

#### IV. THE SYSTEM AND SIMULATION RESULT

Fig. 10 shows the device and software used for the simulation. A picture illustrating plaque removal in action is shown in Fig. 11.

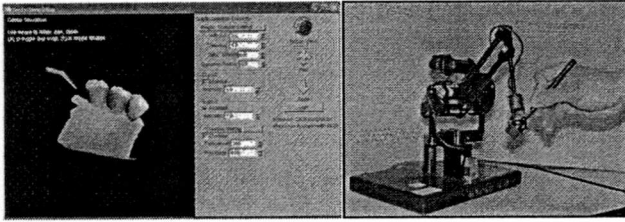


Fig. 10. The device and software used in our training system

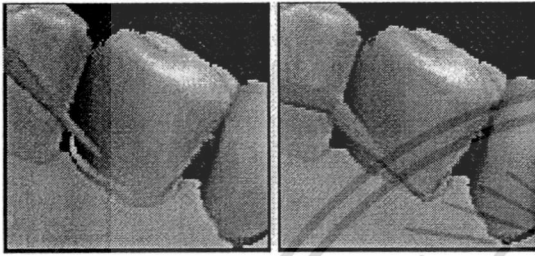


Fig. 11. Plaque removal in action

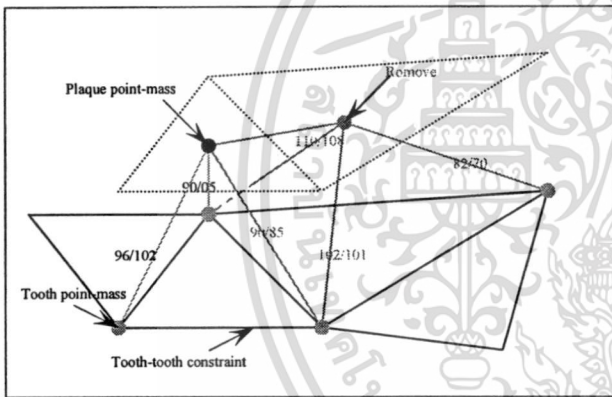


Fig. 12. Visualization of plaque fragmentation (a / b : "a" is the constraint force and "b" is the constraint strength)

Here, each tooth was constructed from 305 points with 535 polygons, and gums were modeled as 227 points with 384 polygons. There were 64 teeth polygons which intersected with gums polygons. Initially, physical plaque model had 130 point-masses and 346 constraints. The constraint strengths were determined by a combination of a turbulence function and geometric heuristics. The constraints would be broken when its constraint force was more than constraint strength (denoted as red lines in Fig. 12). Plaque point-masses would be removed when all its neighbor tooth-plaque constraints were broken (denoted as red dot in Fig. 12).

#### V. CONCLUSIONS

We have presented a haptic simulation technique for practicing dental plaque removal. Two plaque models has been described, namely the graphical model and the physical model. Simulation of exerting force and plaque fragmentation has also been described. An exerting force is due to both user's hand pressing and vibration of a dental plaque removal tool. The techniques developed form a basis for development of a complete interactive dental training system with haptic force feedback. The system can provide a variety of training cases, while eliminating the use of wasteful training material. The technique used in the system can be applied to develop other dental training systems such as tooth drilling.

#### VI. REFERENCES

- [1] D. Terzopoulos and K. Fleischer. "Modeling inelastic deformation: Viscoelasticity, plasticity, fracture," *In Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings)*, Vol. 22, pp. 269-278, August 1988.
- [2] A. Norton, G. Turk, B. Bacon, J. Gerth, and P. Sweeney. "Animation of fracture by physical modeling," *Visual Computing*, 7(4): pp. 210-219, 1991.
- [3] J. O'Brien and J. Hodgins "Graphical modeling and animation of brittle fracture," *SIGGRAPH 99 Conf. Proceedings*, pp. 287-296, 1999.
- [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] T. Moller. "A Fast Triangle-Triangle Intersection Test," *J. Graphics Tools*, 2(2):25-30, 1997.
- [6] K. Perlin. "An image synthesizer," *SIGGRAPH 85Conf. Proceedings*, pp. 287-296, 1985.
- [7] A. Witkin and D. Baraff, "Physically Based Modeling: Principles and Practice," *SIGGRAPH Course Notes, ACM SIGGRAPH*, 1997.
- [8] 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.
- [9] D. Terzopoulos and K. Fleischer. "Modeling inelastic deformation: Viscoelasticity, plasticity, fracture," *In Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings)*, Vol. 22, pp. 269-278, August 1988.
- [10] A.A. Griffith, "The Theory of Rupture," *The Proceedings of the First International Congress of Applied Mechanics*, 1924.
- [11] C. Ericson, "Real-Time Collision Detection," Morgan Kaufmann, USA, 2005
- [12] E. Angel, "Interactive Computer Graphics" (third edition), Addison-Wesley, 2000, ISBN 0-321-19044-0