

# A survey on 3D Model of skeletonisation methodologies

นิธินันท์ มาตา

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

## Abstract

Skeleton เป็นข้อบ่งชี้ที่สำคัญสำหรับรูปทรง มีประโยชน์สำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นการซ่อมแซม (การดึง การแก้ไข การเอากลับคืน) การถ่ายภาพทางการแพทย์ หรือแม้แต่การสร้างการเคลื่อนไหว งานวิจัยในปีที่ผ่านมา มีการพัฒนาและนำเสนอเทคนิคหรืออัลกอริทึมที่แตกต่างกันสำหรับการสกัด skeleton จากโมเดล 3 มิติ แต่ละเทคนิคพยายามที่จะดำเนินการเพื่อให้บรรลุเป้าหมายที่เจาะจง ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอบทความสำรวจอัลกอริทึมในการทำ skeletonisation ในแต่ละอัลกอริทึมที่ถูกนำเสนอในปีที่ผ่านมา จะทำให้ได้ผลลัพธ์เป็น skeleton 2 รูปแบบด้วยกัน คือ curve – skeleton และ kinematic – skeleton ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบ ต้องสามารถแทนรูปทรง 3 มิติ ของวัตถุต้นแบบได้ จากการสำรวจพบว่าส่วนใหญ่แล้ว curve – skeleton จะเหมาะสมกับงานประเภทของการวิเคราะห์และแยกแยะวัตถุในการรู้จำ เน้นการตอบสนองต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ skeleton พึ่งมี หรือเกณฑ์การวัดคุณภาพของ skeleton ส่วน kinematic – skeleton จะเหมาะสมกับการนำผลลัพธ์ของ skeleton ที่สกัดได้มาสร้างการเคลื่อนไหวให้กับวัตถุในอนาคตเนื่องจาก kinematic – skeleton มีสร้างและแสดงข้อต่อ (joint) ที่สอดคล้องกับชิ้นส่วนของวัตถุ จึงส่งผลให้แก้ไขวัตถุในอนาคตได้

## 1. Introduction

ปัจจุบันโมเดล 3 มิติ ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็นในด้าน คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) ภาพถ่ายทางการแพทย์ (Medical Imaging) คอมพิวเตอร์กราฟิก (Computer Graphics) การจำลองวิธีการทางคณิตศาสตร์ (Scientific Visualization) วิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ (Computational Fluid Dynamics) และเทคโนโลยีด้านการสำรวจระยะไกล (Remote Sensing) ในขณะที่การแสดงผลหรือการนำเสนอโมเดล 3 มิติ เป็นสิ่งที่จำเป็นและมีประโยชน์มากมาย การใช้งานส่วนใหญ่ต้องการทางเลือกในการนำเสนอโมเดล 3 มิติ ในรูปแบบที่เล็กและกะทัดรัด (Compact) หนึ่งในรูปแบบการแสดงผลดังกล่าวเป็นเหมือนเส้นหรือเหมือนแท่งเพื่อเป็นตัวแทนโมเดล 3 มิติ ในรูปแบบ 1 มิติ ซึ่งเป็นนามธรรมสำหรับการรับรู้รูปร่าง บางครั้งจะเรียกว่า การสร้างโครงกระดูก (Skeleton Representation)

Skeleton เป็นที่รู้จักกันดีและใช้การอย่างแพร่หลาย คือส่วนที่ compact ที่สุดที่สามารถอธิบายถึง meshes ของโมเดล 3 มิติ ได้ดี นิยามของ meshes skeleton ที่เป็นทางการถูกนิยามโดย [1] เริ่มต้นด้วยแกนกลาง (medial axis) และใช้พื้นที่รอบๆ แกนกลาง (MGF) อย่างไรก็ตามสิ่งที่ถูกนำเสนอในภายหลังกล่าว

ไว้ว่านิยามจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งานและการประยุกต์ใช้บน application ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้คุณสมบัติของกระดูกสามารถช่วยสร้างความหมายของของรูปร่าง คุณสมบัติที่ระบุไว้ใน [2] แสดงตัวอย่างของความมีประสิทธิภาพ เรื่องความเรียบ และมีความเป็นศูนย์กลาง โดย meshes skeleton มีการใช้งานหลายอย่าง เช่น การทำงานด้านการเคลื่อนไหว การติดตาม และ Registration (เป็นการนำข้อมูลโมเดล 3 มิติตั้งแต่สองกลุ่มขึ้นไปมารวมกันเพื่อให้เกิดภาพ 3 มิติ ใหม่ที่มีข้อมูลภาพสมบูรณ์มากขึ้น การ Registration จะต้องมีการกำหนดจุดควบคุม (control points) ไปบนข้อมูล 3 มิติ ของทุกกลุ่มก่อนที่จะทำการ Registration)

การสกัด skeleton จากโมเดล 3 มิติ เป็นกระบวนการที่ทำหายโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการความเป็นอิสระจากผู้ใช้ มีงานวิจัยหลายงานที่ศึกษาปัญหาวิธีการสกัด skeleton โดยจะแสดงให้เห็นในบทความต่อไป แต่ผลงานวิจัยที่ถูกนำเสนอล้วนแสดงข้อบกพร่องหลักของอัลกอริทึมที่เกิดจากความซับซ้อนของพารามิเตอร์และการดำเนินการ

ในบทความนี้เป็นบทความสำรวจ นำเสนอเกี่ยวกับการสกัด skeleton ไม่ว่าจะเป็นอัลกอริทึมการทำ skeletonization ที่แตกต่างกันเพื่อการใช้ประโยชน์กับงานเฉพาะอย่างเพื่อตอบสนองต่อคุณสมบัติของงานที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในแต่ละอัลกอริทึมที่ถูกนำเสนอจะทำให้ได้ผลลัพธ์ skeleton 2 รูปแบบด้วยกัน คือ curve – skeleton และ kinematic – skeleton ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบ ต้องสามารถแทนรูปทรง 3 มิติ ต้นแบบได้ และต้องนำไปใช้ประโยชน์ตามงานที่เหมาะสม โดยส่วนใหญ่แล้ว curve – skeleton จะเหมาะสมกับงานประเภทของการรับรู้วัตถุเพื่อวิเคราะห์และแยกแยะวัตถุในการรู้จำ เน้นการตอบสนองต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ skeleton ฟังก์ชัน หรือเกณฑ์การวัดคุณภาพของ skeleton ส่วน kinematic – skeleton จะเหมาะสมกับการนำผลลัพธ์ของ skeleton ที่สกัดได้มาสร้างการเคลื่อนไหวให้กับวัตถุในอนาคตเนื่องจาก kinematic – skeleton มีสร้างและแสดงข้อต่อ (joint) ที่สอดคล้องกับชิ้นส่วนของวัตถุ ส่วนที่เหลือของบทความจะมีโครงสร้างตามนี้ : section 2 คือประเภทของอัลกอริทึมที่ใช้ในการสกัด skeleton ใน section 3 เสนอคุณสมบัติของ skeleton หรือเกณฑ์คุณภาพที่ใช้วัด section 4 แสดงให้เห็นรูปแบบของ skeleton ที่ได้จากการสกัดด้วยอัลกอริทึมที่ต่างกัน และความต่างของรูปแบบนั้น ในขณะที่ section 5 คือการสรุปและทิศทางงานในอนาคต

## 2. Skeletonisation Algorithms

การทำ skeletonisation เป็นวิธีการดึงเอาข้อมูลรูปร่างของโมเดล 3 มิติ ออกมาโดยข้อมูลที่ได้อาจจะเป็นข้อมูลที่มีการลดมิติลง กล่าวคือการนำข้อมูลที่ได้อาจจะเป็นข้อมูล 1 มิติ ไปใช้งานจะง่ายกว่าข้อมูลดิบของชิ้นงานซึ่งเป็นข้อมูล 3 มิติ นั้นได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องตลอด 10 ปีที่ผ่านมา เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการทำงานที่แตกต่างกันออกไป [2] ได้ทำการแบ่งอัลกอริทึมในการทำ skeletonisation ออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ การกำหนดขอบเขตและลดขอบเขตให้บางลง การใช้ข้อมูลระยะทาง การใช้เรขาคณิต และฟังก์ชันข้อมูลทั่วไป อัลกอริทึมแต่ละแบบมีการทำงานดังนี้

2.1 Thinning เป็นกลุ่มการกำหนดขอบเขตและลดขอบเขตให้บางลง โดยอัลกอริทึมจะมีการค้นหาขอบเขตของโมเดล 3 มิติ และทำการลบชั้นของขอบเขตโมเดล โดยทำซ้ำ ๆ จนกว่าจะได้ skeleton ที่ต้องการ

2.2 Distance Filed เป็นกลุ่มการใช้ข้อมูลระยะทางในการทำ skeletonisation นั้นจะใช้

$$D(P)_{P \in O} = \min_{Q \in B(O)}(d(P, Q)) \quad (1)$$

โดยที่  $P$  เป็นตัวแทนจุดภายในของโมเดล 3 มิติ ( $O$ )

$B(O)$  เป็นขอบของโมเดล

และ  $d(.,.)$  เป็น metric distance function

2.3 Geometric เป็นกลุ่มการใช้เรขาคณิตโดยวิธีการของ Voronoi diagram, cores, M-reps และ Reeb graphs

2.4 General Field เป็นกลุ่มการใช้ฟังก์ชันข้อมูลทั่วไปที่นอกเหนือจากที่กล่าวมา คือ ฟังก์ชันที่ใช้ข้อมูลอื่นที่เกี่ยวข้องกับ electrostatic ซึ่งกำลังมาแรงและเป็นที่น่าสนใจ และฟังก์ชันพื้นฐานของรัศมีซึ่งมีขั้นตอนวิธีการจะทำงานบนขอบเขตของ meshes หรือ point cloud เป็นฟังก์ชันใหม่ที่ใช้งานง่ายและตอบสนองความต้องการคุณสมบัติของ skeleton ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 3. Properties of skeleton

การทำ skeletonization โมเดล 3 มิติ ที่สร้างขึ้นจากรูปหลายเหลี่ยม เป็นขอบเขตการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยหรือความก้าวหน้าของ computer graphics และ computer vision ที่ทำให้ skeleton มีความสำคัญ และมีความสำคัญมากยิ่งขึ้นในฐานะการเป็นตัวแทนที่ดีสำหรับวัตถุประสงค์การประมวลผลและการส่งผ่าน (การนำไปใช้ต่อ) ดังนั้นสิ่งที่ต้องการในขณะนี้คือการวิเคราะห์คุณสมบัติที่เป็นตัวอธิบายถึง skeleton ความต้องการในการใช้งาน และวิธีการทำ skeletonization ที่ตอบสนองต่อคุณสมบัติของ skeleton ที่หลากหลาย มีหลายอัลกอริทึมที่มุ่งเน้นไปที่ปัญหาการทำ skeletonization โดยสามารถแบ่งออกเป็นแนวทางที่แตกต่างกัน ทุกวิจัยล้วนแล้วแต่ทราบและยอมรับชุดของเกณฑ์การประเมินที่ใช้วัดคุณภาพของโครงกระดูกที่สร้างขึ้นควรเป็นไปตามเกณฑ์เหล่านั้น จาก [2] พบว่าเกณฑ์คุณภาพสำหรับการสร้างโครงกระดูกแบบจำลอง 3 มิติ ที่ได้รับการยอมรับโดยทั่วไป มีดังนี้

3.1 **Homotopic:** เป็นการทำ skeletonization แบบ voxel – based (ย่อมาจาก volume pixel หมายถึง ปริมาตรที่เล็กที่สุดที่รวมตัวกันเป็นภาพ) โดยโครงสร้าง skeleton ที่สร้างขึ้นต้องรักษาโครงร่างเดิมแบบจำลองของ 3D Meshes โดยสร้างการเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนเล็กๆ [3] แต่อย่างไรก็ตามหาก skeleton มีคุณสมบัติเรื่องความบาง (Thin) แล้วจะบังคับให้เกิดคุณสมบัติ homotopy ได้ค่อนข้างง่าย [4, 5]

3.2 **Invariant under isometric transformations:** เหมือนกับ homotopy ที่เป็นวิธีการแบบ voxel – based คือไม่คงอยู่ภายใต้การ isometric transformations โดยโครงสร้าง เป็นวิธีการแบบ mesh-

based ที่ใช้ Euclidean distance transforms ที่แท้จริงในการช่วยให้คงที่ [6] แต่ไม่สามารถรับประกันได้ [7]

**3.3 Reconstruction:** skeleton (ในที่นี้หมายถึงพื้นผิวตรงกลาง) ของโมเดล 3 มิติ เป็นชิ้นส่วนพื้นผิวที่ การนำเสนอโครงกระดูกกันความสมมาตรของโมเดล ในขณะที่เส้นโค้งที่ประกอบเป็นโครงกระดูกมีลักษณะ เหมือนท่อทรงกลมที่สอดคล้องกับรูปร่าง โดยไม่คำนึงถึงวิธีการคำนวณที่ได้มา ดังนั้นการทำให้ reconstruction (การสร้างใหม่) ที่สมบูรณ์และถูกต้องของโมเดลเดิมนั้นเป็นไปได้จาก skeleton เพียงอย่างเดียวเมื่อใช้วิธี ball-growing เนื่องจาก skeleton มีเพียง segments และชิ้นส่วนของวัตถุที่แบนไม่สามารถสร้างใหม่ได้จาก สิ่งเหล่านี้ แต่ถ้า skeleton เป็นทรงกระบอกจะสามารถสร้างวัตถุขึ้นมาใหม่ได้ เห็นได้ชัดว่า skeleton ที่ หนาแน่นขึ้นสามารถสร้างพื้นผิวของวัตถุขึ้นมาใหม่ได้ดีขึ้น [8]

**3.4 Thinness:** skeleton เป็นลักษณะ 1 มิติ ที่มี voxel หนาแน่นที่สุดในทุกทิศทาง ยกเว้นที่ข้อต่อ (joint) ของ skeleton จะมีลักษณะที่หนาเพื่อให้แน่ใจว่ามีการเชื่อมต่อระหว่างสาขา (branch) ที่แตกต่างกัน

[9] สามารถแยก curve-skeleton point ออกเป็น 3 ประเภท ตามความแตกต่าง ดังนี้ ประเภทแรก คือจุดปกติบนเส้นโค้ง 1 มิติ ประเภทที่สองคือจุดสิ้นสุดของเส้นโค้งที่ และประเภทที่ 3 จุดเชื่อมต่อ (ที่เส้นโค้ง มาบรรจบกัน) คุณสมบัติด้านความบางสามารถตรวจสอบได้ง่ายถ้าเรารู้จุดเชื่อมต่อล่วงหน้า วิธีการ skeletonization บางวิธีสามารถระบุจุดเชื่อมต่อได้โดยตรง [10] [11] ถ้าไม่สามารถระบุจุดเชื่อมต่อได้ล่วงหน้าก็ สามารถหาจุดเชื่อมต่อได้ด้วยวิธีการอื่น

Thinning algorithms สามารถสร้างได้โดยตรงจาก skeleton โดยใช้ thinning templates) หรือ นอกเหนือจากนี้ยังเป็นการทำให้บางเพื่อนำเสนอในรูปแบบ 1 มิติ thinning algorithms แบบขนานนี้จะเอาจุดทั้งหมดออกในครั้งเดียวนั้นเป็นไปได้ที่จะทำให้บรรลุการได้มาซึ่ง skeleton 1 มิติ เนื่องจากข้อจำกัดด้าน homotopy (สองคุณสมบัตินี้ขัดแย้งกัน)

**3.5 Centeredness:** การทำให้ thinning และวิธีการอื่นๆ ทั่วไปในการทำให้ skeletonization จะไม่ รับประกันความ centeredness แต่คุณลักษณะนี้เป็นคุณลักษณะที่สำคัญของ skeleton ดังนั้นเพื่อให้บรรลุ centeredness ที่สมบูรณ์ skeleton ต้องอยู่บน medial surface เนื่องจาก medial surface คือศูนย์กลาง ภายในวัตถุ นอกจากนี้แล้วยังต้องมีเส้นโค้งที่เป็นศูนย์กลางใน medial surface อีกที่ [1, 12] ในการทำให้ shape compression และบาง scientific applications เช่น vortex core extraction [13] การหา centeredness ของ skeleton อาจเป็นสิ่งที่จำเป็น อย่างไรก็ตามในกรณีส่วนใหญ่ centeredness ของการ สกัด skeleton ก็ไม่จำเป็นต้องใช้หรือต้องการ

วิธีการหนึ่งที่เป็นไปได้ในการหา centeredness ของ skeleton คือการค้นหาจำนวนการกระจายตัว ของรัศมีที่ไม่มีรูปแบบในระนาบปกติไปในทิศทางของ skeleton ที่จุดใดจุดหนึ่งและวัดระยะทางไปยังเส้นขอบ ของแต่ละรัศมีนี้ จุดที่เป็นตรงกลางควรมีระยะทางไปยังขอบเช่นเดียวกันกับคู่ที่อยู่ตรงข้าม

**3.6 Reliability:** หมายถึงคุณสมบัติของ curve-skeleton ที่ทุกจุดบนพื้นผิวของวัตถุต้องสามารถมองเห็น ได้จากอย่างน้อย 1 ตำแหน่งที่ curve-skeleton [14, 15] ด้วยเหตุผลนี้ คุณสมบัตินี้เป็นเพียงสิ่งเดียวที่ สามารถรับประกันว่าอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาใช้ได้กับวัตถุประสงค์เฉพาะอย่าง โดยไม่คำนึงถึงวิธีการในการ

ประมวลผลเพื่อให้ได้ curve-skeleton โดย reliability นั้นสามารถตรวจได้ง่ายดายโดยการใช้การทดสอบการมองเห็นดังกล่าวข้างต้น

**3.7 Smooth:** การทำให้เรียบไม่ได้เป็นเพียงคุณสมบัติด้านความสวยงามเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่จริงๆ แล้วมีประโยชน์กับงานบางอย่างมาก ยกตัวอย่าง เช่น ใน virtual navigation ซึ่งใช้ skeleton เป็นเหมือน camera translation path โดย path ควรจะราบเรียบเท่าที่เป็นไปได้เพื่อหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงที่เป็นแบบกระทันหันในภาพที่ปรากฏ เราสามารถกำหนดความเรียบเนียนของส่วนโค้งในรูปแบบของทิศทางเส้นสัมผัสในขณะที่เราย้ายไปตามเส้นโค้ง ยิ่งไปกว่านั้นเราสามารถวัดมุมระหว่างทิศทางสัมผัสในตำแหน่งที่ต่อเนื่องตามเส้นโค้งและใช้ส่วนเบี่ยงเบนของค่าเหล่านี้เป็นตัววัดการเปลี่ยนแปลง เพื่อให้ได้ navigation ที่เรียบ

**3.8 Junction Detection and Component-wise differentiation:** เป็นความสามารถในการแยกแยะความต่างขององค์ประกอบที่แตกต่างกันของ skeleton ขึ้นอยู่กับความสามารถในการตรวจสอบจุดเชื่อมต่อจุดเชื่อมต่อเกิดจากเส้นโค้ง 2 เส้น หรือมากกว่านั้นมาบรรจบกัน สะท้อนให้เห็นชิ้นส่วน/องค์ประกอบโครงสร้างนี้เรียกว่า “logical components” ของวัตถุ ควรจะมีความสัมพันธ์แบบ one-to-one กับ logical components ของ skeleton

ไม่มีคำนิยามที่แน่นอนของ logical components ของรูปทรง 3 มิติ แม้จะพยายามอยู่หลายครั้งในการสร้างขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ใน [16] ความหมายของ components คือ การกำหนดเป็นส่วนประกอบที่รับรู้ได้จากวัตถุที่เหลือ ส่วน [17] โครงสร้างส่วนประกอบของรูปทรง 2 มิติ ถูกกำหนดโดยใช้ส่วนประกอบของวัตถุและการคำนวณการเชื่อมต่อรอบจุดที่มีการเชื่อมกันของ medial axis โดยใช้ “visual conductance” และใช้ Reeb graph ในการระบุส่วนประกอบวัตถุ แต่คำนิยามจะขึ้นอยู่กับทางเลือกในการสร้างฟังก์ชัน

ตราบใดที่ curve-skeleton สามารถระบุข้อต่อและจุดเชื่อมต่อได้ แบ่งวัตถุต้นฉบับเพื่อสร้างความสัมพันธ์แบบ one-to-one ระหว่างส่วนประกอบที่แตกต่างกันในวัตถุและ skeleton (สำหรับใช้ในการเคลื่อนไหวหรือการแยก mesh)

[2] การพยายามสร้างความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างวิธีการ skeletonization ที่สามารถระบุข้อต่อหรือจุดเชื่อมต่อก่อนหรือระหว่างการสกัด skeleton และวิธีการดึงเอาข้อต่อเหล่านี้หลังจากสร้าง skeleton แล้ว ถ้าผลลัพธ์ของ skeleton ที่เกิดขึ้น มีเพียงความหนาของ voxel ในทุกทิศทาง เกณฑ์และการพิสูจน์นี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในข้อจำกัดของวัตถุ 3 มิติ ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้บางส่วนมีการปรับแต่งสำหรับการใช้งานที่เฉพาะเจาะจง การตรวจสอบข้อต่อเป็นขั้นตอน post-processing โดยเป็นจุดที่ต้องมีมากกว่า 2 neighbors มันเป็นเรื่องยากมากที่จะระบุจุดเชื่อมต่อเหล่านี้ก่อนที่จะแยก skeleton แบบเต็ม เมื่อแยกข้อต่อในขั้นตอน post processing การระบุข้อต่อจะดีเท่ากับเป็นรากฐานของ skeleton ที่มั่นคง

Component-wise differentiation (ความแตกต่างขององค์ประกอบ) จะแตกต่างจาก homotopy ในการที่เกี่ยวข้องกับ logical perceptual components ของวัตถุที่เชื่อมต่อกันแบบ single connected ในขณะที่ภายหลังมีความกังวลเกี่ยวกับการเชื่อมต่อของการขึ้นรูปเรขาคณิตของวัตถุที่แตกต่างกัน การตรวจสอบว่า curve-skeleton ตอบสนองต่อคุณลักษณะนี้เป็นงานที่ยากเพราะความหมายของส่วนประกอบของวัตถุไม่แม่นยำพอ เกี่ยวข้องกับการรับรู้ของมนุษย์ ซึ่งเป็นเรื่องของแต่ละบุคคล

**3.9 Robustness:** การทำ Thinning โดยใช้ distance field และวิธี Voronoi-based geometric ทำให้อ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนและทำให้เกิด branches ที่ไม่จำเป็นใน skeleton ผลลัพธ์ ซึ่งมีหลากหลายวิธีการที่เสนอการกรอง skeleton ดังกล่าว [18, 19] (robustness คือความทนทาน โดย skeleton จะมีความ sensitive ต่อ noise ที่มาจาก mesh ถ้าเกิด noise จำพวกนี้ต้องเกิดในลักษณะที่ต่ำ)

วิธีการ Level-set based geometric methods ได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนในรูปแบบที่แตกต่างกัน ในขณะที่ตำแหน่งของ level-set centroids ไม่ควรได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนเพราะค่าเฉลี่ยของผลกระทบมีผลต่อการคำนวณ centroid โดยสัญญาณรบกวนมีผลต่อจำนวนของรูปทรงใน level set ดังนั้นจึงเกิด branches ที่ไม่พึงประสงค์ในโครงกระดูกผลลัพธ์

หลายวิธีการมีมักแสดงวิธีการกับตัวอย่างเพียงไม่กี่ตัว และไม่ได้รับการทดลองกับฐานข้อมูลขนาดใหญ่ของวัตถุ 3 มิติ (ตัวอย่าง เช่น Princeton Shape Benchmark [20] ซึ่งเป็นฐานข้อมูลของโมเดล 3 มิติจำนวน 1,814 โมเดล) ดังนั้นจึงไม่ชัดเจนว่ามีความ robust อย่างไร

**3.10 Hierarchical:** ลำดับชั้น (ความสามารถในการสร้างกรอบคร่าวของ skeleton ที่มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น) ไม่ได้ทำได้โดยใช้อัลกอริทึม thinning เพราะเมื่อการประมวลผล voxel มีเพียง 2 ทางเลือก คือ เก็บไว้ หรือลบทิ้ง และจะได้รับ skeleton หลังจากรอบสุดท้ายของอัลกอริทึม

วิธีการทางด้าน Distance สามารถผลิตลำดับชั้นของ curve-skeletons โดยเปลี่ยนแปลงจำนวนของ candidate voxels ที่เลือกในขั้นของการ pruning เพื่อให้ได้ลำดับชั้นที่สมบูรณ์ (เช่น curve-skeleton ที่ level 1 รวมอยู่กับ curve-skeleton ใน level ถัดไป) ขั้นตอน reconnection จะต้องคำนึงถึง skeleton ใน level ก่อนหน้า วิธีการทางด้านระยะทางที่คล้ายกันไม่ว่าจะเป็น Voronoi Based geometric methods สามารถสร้างลำดับชั้นของ skeleton โดย pruning พื้นผิว skeleton ที่ threshold แตกต่างกัน และ reconnecting candidate voxels เข้ากับลำดับชั้นของ skeletons ในกรณีของการทำ mesh decomposition based methods ถ้ากระบวนการ decomposition เป็นลำดับชั้น [16] skeletons ที่ผลิตขึ้นจะอยู่ในรูปแบบลำดับชั้น แต่ Reeb graph based geometric methods ไม่ใช่วิธีการแบบลำดับชั้น

**3.11 Connected:** เป็นผลมาจาก homotopy ถ้า skeleton สอดคล้องกับวัตถุที่เชื่อมต่อ โดยรักษาโครงสร้างของวัตถุ skeleton จะต้องประกอบด้วยองค์ประกอบที่เชื่อมต่อเป็นอันเดียว

**3.12 Efficiency:** การทำ Thinning เป็นกระบวนการเชิงเส้นของจำนวน voxels ของวัตถุ ส่วนใหญ่ของ voxels วัตถุที่เป็นข้อมูลเข้าจะถูกลบออกเมื่อผ่านกระบวนการแรก (เพราะเป็น simple points) จุดที่เป็น non-simple points จะมีการประมวลผลอีกครั้งในทุกขั้นตอนถัดมาของการทำ Thinning จนกระทั่งจะถูกลบออกในที่สุดหรืออัลกอริทึมยุติการทำงาน การวิเคราะห์ความซับซ้อนที่ถูกต้องแม่นยำของอัลกอริทึมดังกล่าวเป็นเรื่องยากเนื่องจากอัลกอริทึมจะขึ้นอยู่กับข้อมูล

ในด้านของ Euclidean distance ของวัตถุ 3 มิติ สามารถคำนวณได้ในเชิงเวลาโดยใช้อัลกอริทึม [21] ขั้นตอนถัดมาของ filtering และ reconnecting curve-skeleton มีความซับซ้อนสูง (แต่พวกเขาสามารถทำงานในการลดชุดของ voxels ได้เป็นอย่างดี)

จาก 12 คุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นเราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัลกอริทึมในการทำ skeletonisation และคุณสมบัติที่สามารถเกิดขึ้นได้ในแต่ละอัลกอริทึม โดยให้ “Yes” เป็นอัลกอริทึมที่สามารถรับประกันว่าจะทำให้บรรลุคุณสมบัตินั้น และ “No” เป็นอัลกอริทึมที่ไม่สามารถทำให้บรรลุคุณสมบัติ และท้ายที่สุดช่องที่ว่างใช้ในกรณีที่คุณสมบัติสามารถบรรลุได้บางส่วนแต่ไม่ทุกวิธีในอัลกอริทึมประเภทนั้น ดังแสดงในตารางที่ 1

|                    | Thinning | Distance Field | Geometric | General Field |
|--------------------|----------|----------------|-----------|---------------|
| Homotopic          | Yes      |                | Yes       | No            |
| Transf.Invariance  |          | Yes            |           | Yes           |
| Reconstruction     | No       |                | No        | No            |
| Thinness           |          |                |           | Yes           |
| Centeredness       |          |                |           |               |
| Reliable           |          |                |           |               |
| Smooth             |          |                |           | Yes           |
| Junction Detection |          |                | Yes       | Yes           |
| Robustness         | No       | No             | No        | Yes           |
| Hierarchical       | No       |                |           | Yes           |
| Connected          | Yes      |                |           |               |
| Efficiency         | Yes      | Yes            | Yes       | No            |

ตารางที่ 1: สรุปคุณสมบัติที่เกิดจากอัลกอริทึมที่แตกต่างกัน

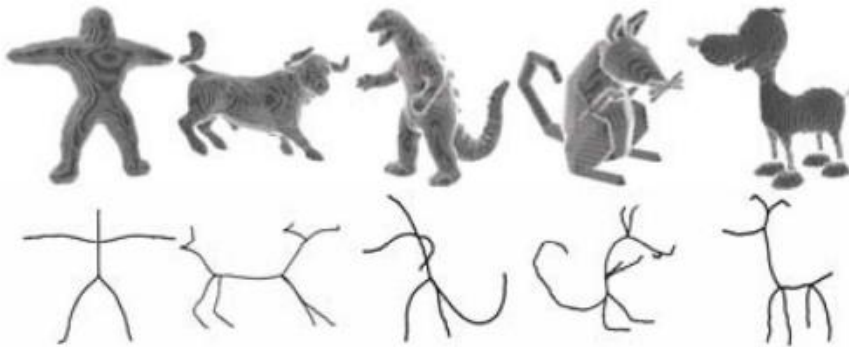
#### 4. Type of Skeleton before skeletonisation process

จากวิธีการที่นำเสนอการสร้าง skeleton โมเดล 3 มิติ ที่เป็นแบบนิ่งหรือจากการเคลื่อนไหวที่ผ่านมาสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ "เส้นโค้งโครงกระดูก (Curve-Skeleton)" [22] และ "โครงกระดูกที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนไหวของร่างกาย (Kinematic-Skeleton or Bone-Skeleton)" หลังถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการควบคุมการเคลื่อนไหวหรือแก้ไขความผิดปกติของโมเดลให้ตรงกัน วิธีการสร้างโครงกระดูกมีอยู่หลากหลายวิธี [23-26] แต่งานวิจัยส่วนใหญ่ที่นำเสนอจะมุ่งเน้นไปที่การสร้าง curve-skeleton

##### 4.1 Curve-skeleton

เป็นที่รู้จักกันดีและใช้งานอย่างกว้างขวางโดยเป็นตัวยุติถึงโมเดล 3 มิติ มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายรูปแบบงาน [27] แตกต่างจากการนำเสนอแบบจำลอง 3 มิติ แบบโครงกระดูกพื้นผิว (Skeletal-Surface) หรือแกนกลางพื้นผิว (Medial Surface) เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีมิติที่สูงกว่า [2] [curve-skeleton (ดังแสดงในรูปที่ 1) จะดึงเอาโครงสร้างที่สำคัญของโมเดลต้นแบบที่เข้าใจง่ายและเป็นรูปแบบที่มีขนาดเล็กมาก สิ่งหนึ่งที่เป็นปัญหาที่ยากของ curve-skeleton คือเป็นสิ่งที่มีความคลุมเครือไม่ชัดเจน นำไปสู่จำนวนของอัลกอริทึม การวิเคราะห์เพื่อการแก้ปัญหาในงานวิจัย และอื่นๆ อีกมากมายที่ถูกนำเสนออย่าง

ต่อเนื่อง หลายอัลกอริทึมในงานวิจัยใช้คำนิยาม พารามิเตอร์ และเกณฑ์ที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานบนโมเดล 3 มิติ ที่มีความหลากหลาย นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมาบางส่วนมีการแก้ไขปรับปรุงสำหรับการใช้งานที่เฉพาะเจาะจง ส่งผลให้เป็นเรื่องยากที่จะตัดสินว่าอัลกอริทึมใดดีที่สุดและเหมาะสมกับงานมากที่สุดเนื่องจากไม่มีเกณฑ์สำหรับการประเมินผลที่แน่ชัด จึงทำให้เกิดการขยายต่อไปของอัลกอริทึมใหม่ วิธีการในการสกัด curve-skeleton สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักคือ volumetric method และ geometric method ขึ้นอยู่กับว่าใช้ interior representation หรือ surface representation โดยทั้ง 2 ชนิดมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 1: ตัวอย่างผลจากการสร้าง Curve-skeleton จากแบบจำลอง 3 มิติ

#### 4.1.1 Volumetric method

ส่วนใหญ่ของวิธีการสกัด curve-skeleton ที่มีอยู่ใช้ volumetric discrete representation ซึ่งเป็นการแบ่ง voxelized representation อย่างสม่ำเสมอหรือเป็นการใช้ประโยชน์จากพื้นที่ที่ไม่ต่อเนื่อง [24] และต้องรู้ข้อจำกัดของโครงสร้างของโมเดล วิธีการเหล่านี้ส่วนใหญ่มีข้อบกพร่องที่เหมือนกันคือการสูญเสียรายละเอียดที่อาจเกิดขึ้นและความไม่แน่นอนที่เกิดจากตัวเลขเนื่องจากการแก้ปัญหาความไม่ต่อเนื่อง ใน [28] ทำการสลายตัวโครงสร้างลำดับชั้นที่ ซึ่งเป็นการทำ thinning ในแต่ละ subvolumn เพื่อแยก skeleton ในท้ายที่สุด [29, 30] นำเสนอวิธีการที่ทำให้วัตถุบางลงแบบขนานในขณะที่พยายามรักษาโครงสร้างเดิมของวัตถุ วิธีการอยู่บนพื้นฐานของการแบ่งพื้นที่ออกเป็นส่วนแบบไม่ต่อเนื่อง และ [31] เป็นฟังก์ชันที่กำลงมาแรงโดยใช้การคำนวณจากเส้นขอบของวัตถุไปจนถึงภายในเพื่อหาจุดในการสร้างเส้นโครงกระดูก ในทำนองเดียวกันกับ [32] ที่มีการหาค่าระยะทางจากเส้นขอบ และ [33] ขั้นตอนการทำ thinning เป็นการ guided ด้วยตัววัดที่เรียกว่า *medial persistence* เพื่อเพิ่มความแข็งแกร่งให้กับวิธีการ

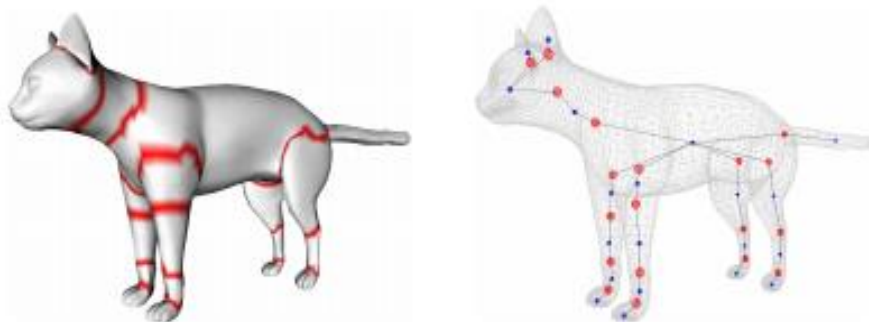


#### 4.1.2 Geometric method or Mesh-Based Method

หรือวิธีการทางเรขาคณิตจะทำงานโดยตรงบน polygon meshes หรือ point sets โดยมี Voronoi diagram เป็นวิธีการทางเรขาคณิตที่ได้รับความนิยม วิธีการดังกล่าวมีการประมาณค่า medial surface โดยสกัดเส้นขอบภายในและผิวนอกของ Voronoi diagram [1, 34, 35] และ prune medial surface ก็จะได้รับ curve-skeleton

วิธีการ Reeb-graph-based ได้รับความสนใจอย่างมากในปีที่ผ่านมา Reeb graph เป็นโครงสร้างแบบ 1 มิติ มี node เป็น critical points ของ real-value function ที่กำหนดไว้บนพื้นผิวของโมเดล โดย encode โครงสร้างของโมเดล [36] วิธีการอื่นที่แตกต่างกันใช้ real-value functions ที่หลากหลายสำหรับการใช้งานที่เฉพาะเจาะจง เช่น geodesic function [37] หรือ harmonic function [38] เพื่อแสดง curve-skeleton นั้น Reeb graph ต้องการการ resample บนพื้นผิวโมเดลส่งผลให้ได้รับโหนดของ skeleton เพิ่มขึ้น และจากนั้นจะฝังลงไปในรูปแบบเรขาคณิต [38] นำเสนอ harmonic Reeb graph ที่ใช้ harmonic function โดยการแก้สมการลาปลาซ วิธีการของพวกเขาต้องการผู้ใช้เพื่อระบุเงื่อนไขขอบเขตให้ชัดเจน และวิธีการสร้างทางเรขาคณิตของ [24] ใช้เงื่อนไขของลาปลาเซียนและทำกับทุก vertices เหมือนเงื่อนไขของเส้นขอบด้วยน้ำหนักที่กำหนดโดยอัตโนมัติ

มีวิธีการอื่นๆ อีกที่ไม่ถูกจัดกลุ่มรวมเข้าไปด้วยวิธีการทั่วไปเหมือนที่กล่าวไปแล้วด้านบน เช่น [39] สกัด skeleton จากทั้ง point clouds และ polygonal meshes บนพื้นฐานของ deformable model evolution การเริ่มต้นสกัดกราฟจะมีสัญญาณรบกวนจึงต้องการ filtering และ merging [10] สกัด curve-skeleton โดยใช้ force-following algorithm บนมุม convex ของ mesh แต่วิธีการเหล่านี้มักขึ้นอยู่กับศักยภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ซึ่งมีราคาแพง [16] สกัด skeleton โดยการสลาย mesh และการเชื่อมต่อขององค์ประกอบ [40] ลดความซ้ำซ้อนของ mesh รวมเข้ากับเส้นที่แบ่งส่วน โดยการยุบขอบให้สั้นกว่าและเชื่อมเส้นแบ่งส่วนใหม่ แต่สองวิธีการหลังสุดนี้สร้าง curve-skeleton ที่หยابและไม่รักษาโครงสร้างเดิมของวัตถุ



รูปที่ 2 ตัวอย่างผลจากการสร้าง Kinematic-skeleton จากแบบจำลอง 3 มิติ

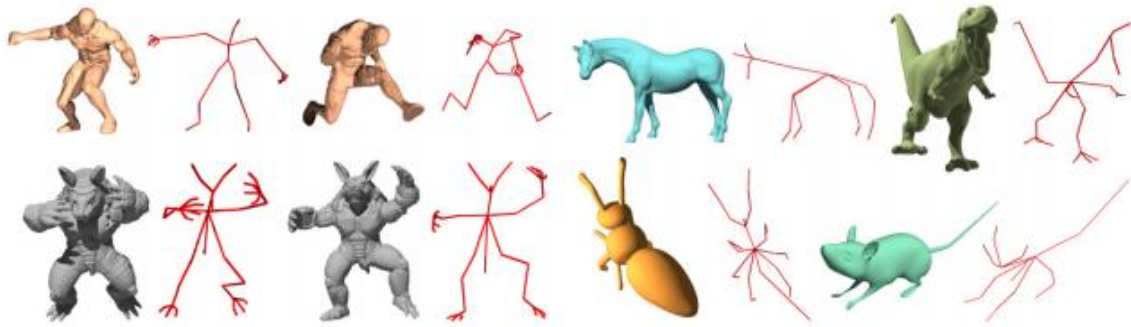
#### 4.2 Kinematic-Skeleton

(ดังแสดงในรูปที่ 2) นั้นแตกต่างกับ curve-skeleton ตรงที่ curve-skeleton นั้นมีโหนดส่วนใหญ่ที่มีส่วนประกอบเพื่อการพิจารณาในการสร้าง skeleton เป็นโหนดไม่มีความจำเป็น แต่ต้องใช้โหนดที่ไม่จำเป็นเหล่านั้นเพื่อทำให้ skeleton ที่สร้างขึ้นตอบสนองต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ในงานที่ใช้ เช่น ความเรียบ (smooth) ของ skeleton ผลลัพธ์ แต่ Kinematic-Skeleton จะมีการพิจารณาเลือกโหนดทั้งหมดอย่างระมัดระวังเนื่องจากโหนดที่เกี่ยวข้องเหล่านั้นจะกลายเป็นข้อต่อ (joint) สำหรับการเคลื่อนไหวของตัวละครในอนาคต ดังนั้นหากจะทำการแปลงโดยตรง (downsampling) จาก Curve-skeleton เป็น kinematic-Skeleton เป็นงานที่ไม่ง่ายเพราะอาจทำให้เกิดการผลิตข้อต่อที่ซ้ำซ้อน [24] ข้อต่อที่ได้จาก kinematic-Skeleton แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักที่สำคัญได้แก่ ข้อต่อช่วงไหล่และสะโพก ข้อต่อส่วนย่อยถัดมาคือข้อศอก และข้อเข่า โดยข้อต่อย่อยไม่แยกออกจากส่วนหลักของ kinematic-Skeleton เนื่องจากมีลักษณะที่โดดเด่น โดยคุณสมบัติทางเรขาคณิต เช่น มุม เส้นโค้ง และความหนา ดังนั้นจึงทำให้สามารถจัดการกับข้อต่อเหล่านี้ได้อย่างอิสระ ในการตรวจสอบความถูกต้องใช้แนวคิดของ topological features เช่น Reep Graph และ Morse complex ในอดีตมีการเรียกข้อต่อเหล่านี้ว่า topological joints ต่อมาเปลี่ยนเป็น geometric joints

การสกัด skeleton โมเดล 3 มิติ แบบ kinematic – skeleton สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่

#### 4.2.1 Kinematic skeleton for 3D static meshes

เป็นการสกัด kinematic – skeleton จากโมเดล 3 มิติ ต้นแบบที่ไม่มีการเคลื่อนไหวจากมุมมองที่แตกต่างกัน skeleton ที่ได้มีลักษณะเป็น 1 มิติ เช่นเดียวกับกับ curve – skeleton มุ่งเน้นโครงสร้างของโมเดลที่มีตำแหน่งที่ถูกต้องซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ต้องนำไปใช้กับการขยับและการเคลื่อนไหวของวัตถุในอนาคตได้ วิธีการสกัดโครงกระดูกของโมเดลที่กำหนดที่เป็นที่นิยมก็เป็นวิธีเช่นเดียวกันกับการสกัด curve – skeleton คือใช้วิธีแบบ volumetric method และ geometric method โดย volumetric method สร้างผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้คือ medial axis ที่มีลักษณะเป็น 1 มิติ สามารถเข้าใจได้ง่าย เช่น วิธีการ thinning [24, 41] สร้าง skeleton โดยลบขอบเขตของโมเดลลงทีละชั้นแบบซ้ำๆ ส่วน geometric method [42] ยังเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการสกัด skeleton อยู่ในขณะนี้ มีการศึกษาต่างๆ ที่เกี่ยวกับ geometric method และการสกัด skeleton บนพื้นฐานของ curvature และ geodesic distances [43-45], convex decomposition, and shape diameter function [46] อย่างไรก็ตามคุณลักษณะทางเรขาคณิตของพื้นผิวค่อนข้างไวต่อการเปลี่ยนรูปและสัญญาณรบกวนในโมเดล นอกจากนี้ [J. Ma and S. Choi] ได้นำเสนอวิธีการแบบผสม (Hybrid) ที่รวมข้อดีของ volumetric method และ geometric method เข้าด้วยกัน โดยวิธีการนี้ไม่ต้องการ manually-chosen feature points หรือ markers และเป็นอิสระจาก postures (ท่าทาง) และจำนวน branches ที่ได้จากโมเดล วิธีการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสามารถสกัด kinematic-skeleton ได้อย่างมีประสิทธิภาพจากการทดลองกับโมเดลร่างกายชนิดต่าง ๆ และผลที่ได้สามารถนำไปใช้ได้โดยตรงกับการเคลื่อนไหวของตัวละคร แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือจะผลิต skeleton ที่มีลักษณะเหมือนดาว แม้ว่าจะเหมาะสมกับสัตว์ที่ไม่มีกระดูกสันหลัง เช่น แมลงและแมงมุม แถวของกระดูกสันหลังที่เกิดจากโมเดลที่มีลักษณะเหมือนมนุษย์และสัตว์สี่เท้ายังมีลักษณะที่ผิดปกติช่วงลำตัวอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตัวอย่างการสกัด kinematic-skeleton จากโมเดล 3 มิติ และนำผลลัพธ์มาเคลื่อนไหว

#### 4.2.2 Kinematic skeleton for 3D dynamic meshes

เป็นวิธีการที่เพิ่งถูกนำเสนอในไม่กี่ปีที่ผ่านมาเพราะช่วงหลังมานี้เทคโนโลยีด้าน acquisition system ประสบความสำเร็จเป็นอย่างมากทำให้เพิ่มพลังตัวประมวลผลการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับ dynamic meshes ในโดเมนของ multimedia โดยทั่วไปแล้ว dynamic meshes จะนำเสนอลำดับของ meshes 3 มิติ (เช่น sequence of frame) แต่มีข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับการ connectivity และ time - varying geometry (ตำแหน่งของ vertices เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา) ในทำนองเดียวกันกับ static meshes นั้น dynamic meshes ก็ต้องการโครงสร้างที่นำเสนอ เช่น skeleton เป็น key ingredient สำหรับสร้างแบบจำลองและแก้ไข (ต้องการการ pre - processing) และเนื่องจากการสกัด kinematic-skeleton จาก static meshes นั้นเกิดปัญหาในเรื่องของพื้นผิวโมเดลที่มีการสกัด kinematic-skeleton แล้วจะอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงทางของวัตถุและเกิดสัญญาณรบกวน

วิธีการสกัด kinematic-skeleton จาก dynamic meshes [47, 48] ที่ถูกนำเสนอมาแล้วนั้น ส่วนใหญ่จะใช้หลักการบนพื้นฐานของ motion-based geometric segmentation methods [27, 49] โดยเป็นการสลาย meshes โดยประโยชน์จากข้อมูลแบบชั่วขณะ โดยมีการ assume ว่าการเคลื่อนไหวของตัวละครมีลักษณะสม่ำเสมอ Tierny et al. [50] นำเสนอการแสดงผลโมเดล 3 มิติ โดยใช้ชุดของ level lines (หรือ contours) และหลังจากนั้นจะเกี่ยวเฉพาะ maximize an edge-length deviation function เมื่อเวลาผ่านไป โดยฟังก์ชันนี้จะช่วย capture articulations ของวัตถุ และ [51] นำเสนอวิธีการสกัด kinematic-skeleton จาก dynamic meshes แบบ automatic วิธีการนี้จะทำบนพื้นฐานของ motion boundary สามารถนำเสนอ motion node ที่สอดคล้องกับข้อต่อของวัตถุ นอกจากนี้ skeleton ยังสอดคล้องกับชิ้นส่วนของวัตถุ ดังนั้นจึงทำให้แก้ไขวัตถุได้ในอนาคต

### 5. Discussion Summary

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการสกัด skeleton เริ่มตั้งแต่อัลกอริทึมในการทำ skeletonization ที่แตกต่างกันเพื่อการใช้ประโยชน์กับงานเฉพาะอย่างหรือตอบสนองต่อคุณสมบัติของงานที่ต้องการได้อย่างมี

ประสิทธิภาพ โดยอัลกอริทึมที่ใช้ในการทำ skeletonization แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ การกำหนดขอบเขต และลดขอบเขตให้บางลง การใช้ข้อมูลระยะทาง การใช้เรขาคณิต และฟังก์ชันข้อมูลทั่วไป อัลกอริทึมแต่ละแบบมีการโฟกัสไปที่ส่วนขององค์ประกอบของวัตถุ และมีขั้นตอนการทำงานที่แตกต่างกัน การทำ skeletonization

ด้วยอัลกอริทึมทั้ง 4 กลุ่ม สามารถสกัด skeleton จากโมเดล 3 มิติ ได้ 2 รูปแบบ คือ “curve-skeleton” ซึ่งเป็นการสกัด skeleton ที่ผลลัพธ์ของ skeleton สุดท้ายจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่เป็นตัวแทนของวัตถุที่อยู่ตรงกลางโมเดล 3 มิติ มุ่งเน้นให้ skeleton thinning และต้องสามารถรักษาโครงสร้างเดิมของวัตถุเพื่อประโยชน์กับการระบุหรือการรู้จำวัตถุต้นแบบ นอกจากนี้ curve-skeleton มักจะทำกับโมเดล 3 มิติที่มีลักษณะเป็น static และไม่สามารถนำมาสร้างการเคลื่อนไหวที่สมบูรณ์ให้กับโมเดลได้เนื่องจากไม่มีข้อต่อที่ชัดเจน มีเพียงจุดรวมเส้น curve ที่มาจากส่วนต่างๆ ขององค์ประกอบที่สกัดได้อีกรูปแบบที่ได้จากการทำ skeletonization คือ “kinematic – skeleton” โดยเป็นการสกัด skeleton ที่ผลลัพธ์สุดท้ายจะมีการแสดง skeleton ที่ไม่ได้มีเพียงเส้นโค้ง 1 มิติ ดังเช่น curve-skeleton หากแต่ kinematic – skeleton ก็มีลักษณะเป็น 1 มิติ แต่ skeleton ผลลัพธ์จะประกอบด้วยข้อต่อ (joint) ซึ่งเทียบได้กับข้อต่อกระดูกของสิ่งมีชีวิต นี้เองทำให้ kinematic – skeleton สามารถนำมาสร้างการขยับและเคลื่อนไหวโมเดล 3 มิติในอนาคตได้ นอกเหนือจากนี้ kinematic – skeleton สามารถสกัดจากโมเดล 3 มิติ ที่เป็นแบบ static meshes และ dynamic meshes ได้ ที่ต้องมีการสกัด kinematic – skeleton จาก dynamic meshes (วัตถุที่มีการเคลื่อนไหว) เนื่องจากการสกัด skeleton จากโมเดล 3 มิติ ที่ไม่มีการเคลื่อนไหว เมื่อนำ skeleton ที่ได้ไปกำหนดการเคลื่อนไหวจะทำให้ผิวของโมเดล 3 มิติ แล้วจะอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนท่าทางของวัตถุและเกิดสัญญาณรบกวน บนพื้นผิวของวัตถุต้นแบบ

งานวิจัยที่ถูกนำเสนอที่ผ่านมามีการเลือกใช้อัลกอริทึมที่เหมาะสมกับงานที่เฉพาะของตนและมีการตรวจสอบความแม่นยำที่ไม่เหมือนกัน เกณฑ์ในการหาคุณภาพและคุณสมบัติที่นิยมใช้กันมีทั้งหมด 12 เกณฑ์ บางเกณฑ์จะเกิดต่อเนื่องกัน ยกตัวอย่างเช่น หาก skeleton มีคุณสมบัติเรื่องความบาง (thin) แล้วจะบังคับให้เกิดคุณสมบัติ homotopy ได้ค่อนข้างง่าย เป็นต้น คุณสมบัติที่สามารถบรรลุได้ก็ตั้งขึ้นกับอัลกอริทึมที่เลือกใช้ในการทำ skeletonisation ด้วย โดยอัลกอริทึมที่สร้างมาสร้างคุณสมบัติที่ควรบรรลุได้เยอะที่สุดคือ ฟังก์ชันข้อมูลทั่วไป โดยสามารถสร้างคุณสมบัติดังนี้ Invariant under isometric transformations, Thinness, Smooth, Junction Detection , Robustness และ Hierarchical การหาคุณภาพและคุณสมบัติส่วนใหญ่จะมีการเปรียบเทียบกันเฉพาะในกลุ่มของ curve – skeleton แต่ยังไม่มีการเปรียบเทียบในส่วน of kinematic – skeleton ทั้งที่เป็นการสกัด skeleton ที่มีความสำคัญไม่แพ้กัน

บทความในอนาคตจะทำการเปรียบเทียบคุณภาพและคุณสมบัติของการสกัด skeleton แบบ kinematic – skeleton เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่พึงบรรลุสำหรับนำไปใช้ในการเคลื่อนไหวของโมเดล 3 มิติต่อไป

## 6. References

- [1] T. K. Dey and J. Sun, "Defining and computing curve-skeletons with medial geodesic function," in *Symposium on Geometry Processing*, 2006, pp. 143-152.
- [2] N. D. Cornea, D. Silver, and P. Min, "Curve-skeleton properties, applications, and algorithms," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 13, pp. 530-548, 2007.
- [3] D. Reniers, J. J. van Wijk, and A. Telea, "Computing Multiscale Curve and Surface Skeletons of Genus 0 Shapes Using a Global Importance Measure," *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, vol. 14, pp. 355-368, 2008.
- [4] C. Arcelli, G. Sanniti di Baja, and L. Serino, "Distance-Driven Skeletonization in Voxel Images," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 33, pp. 709-720, 2011.
- [5] K. Palágyi and A. Kuba, "Directional 3D Thinning Using 8 Subiterations," in *Discrete Geometry for Computer Imagery*. vol. 1568, G. Bertrand, M. Couprie, and L. Perroton, Eds., ed: Springer Berlin Heidelberg, 1999, pp. 325-336.
- [6] J. W. Brandt and V. R. Algazi, "Continuous skeleton computation by Voronoi diagram," *CVGIP: Image Understanding*, vol. 55, pp. 329-338, 5// 1992.
- [7] K. S. a. S. Pizer, "Medial Representations: Mathematics, Algorithms and Applications," *Springer*, 2009.
- [8] N. Gagvani and D. Silver, "Parameter-Controlled Volume Thinning," *Graphical Models and Image Processing*, vol. 61, pp. 149-164, 5// 1999.
- [9] H. Blum and R. N. Nagel, "Shape description using weighted symmetric axis features," *Pattern Recognition*, vol. 10, pp. 167-180, // 1978.
- [10] C. Jen-Hui, T. Chi-Hao, and K. Min-Chi, "Skeletonisation of three-dimensional object using generalized potential field," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 1241-1251, 2000.
- [11] F. F. Leymarie, "3D Shape Representation via Shock Flows," Ph. D. thesis, Brown University, 2003.
- [12] K. Santilli, K. Bemis, D. Silver, J. Dastur, and P. Rona, "Generating realistic images from hydrothermal plume data," in *Proceedings of the conference on Visualization'04*, 2004, pp. 91-98.
- [13] D. C. Banks and B. A. Singer, "Vortex tubes in turbulent flows: identification, representation, reconstruction," in *Proceedings of the conference on Visualization'94*, 1994, pp. 132-139.

- [14] T. He, L. Hong, D. Chen, and Z. Liang, "Reliable path for virtual endoscopy: ensuring complete examination of human organs," *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, vol. 7, pp. 333-342, 2001.
- [15] D.-G. Kang and J. B. Ra, "A new path planning algorithm for maximizing visibility in computed tomography colonography," *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 957-968, 2005.
- [16] S. Katz, G. Leifman, and A. Tal, "Mesh segmentation using feature point and core extraction," *The Visual Computer*, vol. 21, pp. 649-658, 2005.
- [17] R. A. Katz and S. M. Pizer, "Untangling the Blum medial axis transform," *International Journal of Computer Vision*, vol. 55, pp. 139-153, 2003.
- [18] D. Attali and J.-O. Lachaud, "Delaunay conforming iso-surface, skeleton extraction and noise removal," *Computational Geometry*, vol. 19, pp. 175-189, 2001.
- [19] T. Culver, J. Keyser, and D. Manocha, "Exact computation of the medial axis of a polyhedron," *Computer Aided Geometric Design*, vol. 21, pp. 65-98, 2004.
- [20] P. Shilane, P. Min, M. Kazhdan, and T. Funkhouser, "The princeton shape benchmark," in *Shape modeling applications, 2004. Proceedings, 2004*, pp. 167-178.
- [21] T. Saito and J.-I. Toriwaki, "New algorithms for Euclidean distance transformation of an n-dimensional digitized picture with applications," *Pattern recognition*, vol. 27, pp. 1551-1565, 1994.
- [22] S. Svensson, I. Nyström, and G. Sanniti di Baja, "Curve skeletonization of surface-like objects in 3D images guided by voxel classification," *Pattern Recognition Letters*, vol. 23, pp. 1419-1426, 10// 2002.
- [23] T. K. D. a. J. Sun, "Defining and Computing Curve-skeletons with Medial Geodesic Function," *Eurographics Symposium on Geometry Processing*, pp. 143-152, 2006.
- [24] O. K.-C. Au, C.-L. Tai, H.-K. Chu, D. Cohen-Or, and T.-Y. Lee, "Skeleton extraction by mesh contraction," in *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2008, p. 44.
- [25] A. Tagliasacchi, H. Zhang, and D. Cohen-Or, "Curve skeleton extraction from incomplete point cloud," presented at the ACM SIGGRAPH 2009 papers, New Orleans, Louisiana, 2009.
- [26] L. Yong jin, C. Zhanqing, and T. Kai, "Construction of Iso-Contours, Bisectors, and Voronoi Diagrams on Triangulated Surfaces," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 33, pp. 1502-1517, 2011.

- [27] R. Arcila, S. K. Buddha, F. Hétroy, F. Denis, and F. Dupont, "A framework for motion-based mesh sequence segmentation," 2010.
- [28] X. Zhang, J. Liu, Z. Li, and M. Jaeger, "Volume decomposition and hierarchical skeletonization," in *Proceedings of The 7th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*, 2008, p. 17.
- [29] C. M. Ma and M. Sonka, "A fully parallel 3D thinning algorithm and its applications," *Computer vision and image understanding*, vol. 64, pp. 420-433, 1996.
- [30] T. Wang and A. Basu, "A note on 'A fully parallel 3D thinning algorithm and its applications'," *Pattern Recognition Letters*, vol. 28, pp. 501-506, 2007.
- [31] N. D. Cornea, D. Silver, X. Yuan, and R. Balasubramanian, "Computing hierarchical curve-skeletons of 3D objects," *The Visual Computer*, vol. 21, pp. 945-955, 2005.
- [32] M. S. Hassouna and A. A. Farag, "Robust centerline extraction framework using level sets," in *Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on*, 2005, pp. 458-465.
- [33] L. Liu, E. W. Chambers, D. Letscher, and T. Ju, "A simple and robust thinning algorithm on cell complexes," in *Computer Graphics Forum*, 2010, pp. 2253-2260.
- [34] N. Amenta, S. Choi, and R. K. Kolluri, "The power crust," in *Proceedings of the sixth ACM symposium on Solid modeling and applications*, 2001, pp. 249-266.
- [35] R. Ogniewicz and M. Ilg, "Voronoi skeletons: Theory and applications," in *Computer Vision and Pattern Recognition, 1992. Proceedings CVPR'92., 1992 IEEE Computer Society Conference on*, 1992, pp. 63-69.
- [36] V. Pascucci, G. Scorzelli, P.-T. Bremer, and A. Mascarenhas, "Robust on-line computation of Reeb graphs: simplicity and speed," in *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2007, p. 58.
- [37] M. Hilaga, Y. Shinagawa, T. Kohmura, and T. L. Kunii, "Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes," in *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 2001, pp. 203-212.
- [38] G. Aujay, F. Hétroy, F. Lazarus, and C. Depraz, "Harmonic skeleton for realistic character animation," in *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, 2007, pp. 151-160.
- [39] A. Sharf, T. Lewiner, A. Shamir, and L. Kobbelt, "On-the-fly Curve-skeleton Computation for 3D Shapes," in *Computer Graphics Forum*, 2007, pp. 323-328.

- [40] X. Li, T. W. Woon, T. S. Tan, and Z. Huang, "Decomposing polygon meshes for interactive applications," in *Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics*, 2001, pp. 35-42.
- [41] D. Brunner and G. Brunnett, "Fast force field approximation and its application to skeletonization of discrete 3D objects," in *Computer Graphics Forum*, 2008, pp. 261-270.
- [42] X. Chen, A. Golovinskiy, and T. Funkhouser, "A benchmark for 3D mesh segmentation," in *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2009, p. 73.
- [43] A. P. Mangan and R. T. Whitaker, "Partitioning 3D surface meshes using watershed segmentation," *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, vol. 5, pp. 308-321, 1999.
- [44] A. Koschan, "Perception-based 3D triangle mesh segmentation using fast marching watersheds," in *Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings. 2003 IEEE Computer Society Conference on*, 2003, pp. II-27-II-32 vol. 2.
- [45] S. Katz and A. Tal, *Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts* vol. 22: ACM, 2003.
- [46] J.-M. Lien and N. M. Amato, "Approximate convex decomposition of polygons," in *Proceedings of the twentieth annual symposium on Computational geometry*, 2004, pp. 17-26.
- [47] E. De Aguiar, C. Theobalt, S. Thrun, and H. P. Seidel, "Automatic Conversion of Mesh Animations into Skeleton-based Animations," in *Computer Graphics Forum*, 2008, pp. 389-397.
- [48] S. Schaefer and C. Yuksel, "Example-based skeleton extraction," in *Symposium on Geometry Processing*, 2007, pp. 153-162.
- [49] T.-Y. Lee, Y.-S. Wang, and T.-G. Chen, "Segmenting a deforming mesh into near-rigid components," *The Visual Computer*, vol. 22, pp. 729-739, 2006.
- [50] J. Tierny, J.-P. Vandeborre, and M. Daoudi, "Fast and precise kinematic skeleton extraction of 3d dynamic meshes," in *Pattern Recognition, 2008. ICPR 2008. 19th International Conference on*, 2008, pp. 1-4.
- [51] H. Benhabiles, G. Lavoué, J.-P. Vandeborre, and M. Daoudi, "Kinematic skeleton extraction based on motion boundaries for 3D dynamic meshes," in *Eurographics 2012 Workshop on 3D Object Retrieval*, 2012, pp. 71-76.