บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การแสดงภาพด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ได้กลายเป็นส่วนหนึ่งของการประยุกต์ใช้งานเครื่องคอมพิวเตอร์ในทุกแขนงงาน คอมพิวเตอร์กราฟิกส์ (Computer Graphics) จึงเป็นศาสตร์ที่ได้รับความสนใจอย่างมากทั้งในอดีต ปัจจุบัน และอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอมพิวเตอร์กราฟิกส์แบบสามมิติ ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากวิวัฒนาการที่เติบโตไปอย่างคล้องจองกันทางด้านการพัฒนาซอฟต์แวร์ และความสามารถของฮาร์ดแวร์ทางด้านการคำนวณและการแสดงผล ทำให้การแสดงภาพสามมิติกระทำได้รวดเร็ว โต้ตอบกับผู้ใช้โดยตรงในราคาที่ต่ำ การแสดงภาพสามมิติ ไม่ว่าจะเป็นภาพนิ่งหรือภาพเคลื่อนไหว เป็นที่ต้องการอย่างสูง ในการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ในการแสดงผลเพื่อการจินตทัศน์ข้อมูลแบบหลายมิติ (Multidimensional Data Visualization), การแสดงภาพทางการแพทย์ (Medical Imaging) การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (Computer-Aided Design) การวิจัยในเรื่องของความจริงเสมือน (Virtual Reality) และอื่นๆ เป็นต้น

คอมพิวเตอร์กราฟิกส์มีจุดเริ่มต้นที่ MIT ในราวต้นคริสตศตวรรษที่ 1960 ภายใต้งานวิจัยของ Ivan Sutherland ซึ่งเป็นนักศึกษาปริญญาเอกในขณะนั้น ได้เขียนชุดคำสั่งทางกราฟิกส์แบบโต้ตอบขึ้นมา ต่อมาเมื่อ Sutherland มาเป็นอาจารย์อยู่ที่มหาวิทยาลัย Harvard หนึ่งในลูกศิษย์ของเขาคือ Danny Cohen ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมจำลองการขับเครื่องบินแบบสามมิติ ในลักษณะของการวาดภาพแบบเวกเตอร์ นอกจากนี้ Cohen และ Sutherland ได้ร่วมกันพัฒนาหน่วยแสดงผลแบบสวมศีรษะขึ้นเป็นอันแรก ซึ่งมีตัวรับรู้ตำแหน่ง ผู้ใช้สามารถมองผ่านหน่วยแสดงนี้โดยเห็นภาพที่เปลี่ยนแปลงไปตามที่ผู้ใช้เคลื่อนไหว โดยลักษณะภาพจะยังเป็นเพียงแค่เส้นกรอบของวัตถุต่างๆ ประมาณปี ค.ศ. 1968 Sutherland ได้ร่วมงานกับ Dave Evans ที่มหาวิทยาลัย Utah ซึ่งณ.ที่นั้นเป็นจุดเริ่มงานทางด้านสามมิติอย่างจริงจัง

สาขางานวิจัยทางด้านคอมพิวเตอร์กราฟิกส์แบบสามมิติแบ่งออกได้เป็นสองแนวทาง คือ การสร้างภาพเหมือนจริง (Photo-realism Graphics) และการสร้างภาพแบบทันที (Real-time Graphics) ข้อแตกต่างคือ การสร้างภาพเหมือนจริงนั้นมุ่งเน้นแต่การสร้างภาพนิ่งให้เหมือนในโลกแห่งความเป็นจริงที่สุด ด้วยการจำลองแบบและการให้แสงกับส่วนต่างๆของวัตถุในภาพ โดยเวลาในการสร้างนั้นเป็นปัจจัยรอง เราอาจสร้างภาพเหมือนจริงเคลื่อนไหวได้โดยการสร้างภาพเหมือนจริงทีละภาพ (ซึ่งใช้เวลานาน) เมื่อได้ผลลัพธ์เป็นลำดับของภาพนิ่งแล้ว จึงนำออกแสดงออกสู่จอภาพทีละภาพด้วยอัตราความเร็วที่รับรู้เป็นภาพเคลื่อนไหวได้ ในขณะที่การสร้างภาพแบบทันทีนั้นมุ่งเน้นปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อสร้างภาพแบบทันทีตามปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น (โดยคุณภาพของภาพเป็นปัจจัยรอง) ซึ่งโดยทั่วไปจะต้องออกแบบสถาปัตยกรรมทางฮาร์ดแวร์ของหน่วยควบคุมการแสดงภาพ เพื่อให้สามารถสร้างและแสดงภาพได้รวดเร็วขึ้น

งานวิจัยฉบับนี้จะกล่าวถึง การนำพื้นฐานการรับรู้ความลึก การแสดงภาพสามมิติแบบสเตอริโอบนจอแสดงผล และการทำงานบางส่วนของสภาพปฏิบัติการไมโครซอฟต์ วินโดวส์ มาประยุกต์ร่วมกันเพื่อใช้เป็นแนวทางการออกแบบและพัฒนาระบบการแสดงภาพสามมิติแบบสเตอริโอ บนพีซีคอมพิวเตอร์ ที่ใช้สภาพปฏิบัติการไมโครซอฟต์วินโดวส์

แนวความคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การรับรู้ความลึก

ระบบการมองภาพของมนุษย์นั้นใช้การรับรู้หลายอย่าง เพื่อแยกความลึกของตำแหน่งของวัตถุที่มองเห็นการรับรู้ความลึกดังกล่าวนี้ประกอบด้วยสองหลักการใหญ่ๆ คือ ในทางสรีรศาสตร์ (Physiological) และในทางจิตศาสตร์ (Psychological) ในทางสรีรศาสตร์สามารถจำแนกเป็น 4 กลุ่มย่อยคือ

1. Accommodation คือการเปลี่ยนแปลงระยะโฟกัสของเลนส์นัยน์ตาขณะที่เพ่งไปสู่ส่วนที่สนใจ
2. Convergence คือการเคลื่อนลูกตาเข้าหากัน ขณะซึ่งวัตถุเคลื่อนเข้าหาผู้มอง
3. Binocular disparity คือความแตกต่างของภาพที่ฉายมาสู่ตาข้างซ้าย และตาข้างขวา
4. Motion parallax คือการรับรู้การเปลี่ยนแปลงของระยะทางสัมพัทธ์ของวัตถุ เมื่อวัตถุหรือผู้มองมีการเคลื่อนที่

ส่วนการรับรู้ความลึกในทางจิตศาสตร์นั้นมีผลมาจากสิ่งต่อไปนี้

1. Linear perspective คือคุณสมบัติของการมองที่ทำให้ขนาดของวัตถุที่มองมีขนาดเล็กลง เมื่อห่างจากผู้มองมากขึ้น
2. Shading and shadowing คือคุณสมบัติทางแสงในภาพที่ช่วยให้ผู้มองรับรู้ตำแหน่งทางลึกเทียบกับตำแหน่งของแสง
3. Aerial perspective คือคุณสมบัติของการมองที่ทำให้เห็นวัตถุที่อยู่ไกล ชัดเจนน้อยกว่าวัตถุที่อยู่ใกล้
4. Interposition (occlusion) คือการบดบังกันของวัตถุที่ทำให้ผู้มองรับรู้ว่าวัตถุที่อยู่ใกล้จะบังวัตถุที่อยู่ไกลกว่า
5. Texture gradient คือความลาดของเนื้อวัตถุที่ช่วยให้ผู้มองรับรู้ความลึกจากความละเอียดของเนื้อวัตถุที่เห็น
6. Color คือสีของวัตถุซึ่งสามารถช่วยเน้นความลึกได้ โดยวัตถุที่อยู่ใกล้มักมีสีที่สดใสกว่า

โดยทั่วไปแล้วความรับรู้ความลึกที่ได้กล่าวมานี้จะมีคุณสมบัติที่เสริมซึ่งกันและกัน ในบางสถานการณ์คุณสมบัติบางอย่างอาจเด่นกว่าคุณสมบัติอย่างอื่น ตัวอย่างเช่น การบดบังกันของวัตถุจะมีอิทธิพลต่อการรับรู้ความลึกมากกว่า ความแตกต่างของภาพสำหรับตาทั้งสอง เป็นต้น

การแสดงภาพสามมิติ

ในช่วงระยะสิบปีที่ผ่านมา เทคนิคและเทคโนโลยีทางการแสดงภาพสามมิติเกิดขึ้นใหม่มากมาย ประสิทธิภาพของฮาร์ดแวร์เพิ่มสูงขึ้นและราคาลดลง การเปลี่ยนแปลงทางด้านความเร็ว ความละเอียด และราคาของอุปกรณ์ ตลอดจนการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆในการแสดงแสดงผล อาทิเช่น หน่วยปิดเปิดบังคับแสงทางเดียวแบบผลึกเหลว (Liquid-crystal Polarizing Shutter) แผ่นบังแถบขนานแบบผลึกเหลว (Liquid-crystal Parallax Barrier) และเครื่องแสดงผลหลายระนาบ (Multiplanar Display) ต่างก็เป็นส่วนผลักดันให้ การพัฒนาการแสดงภาพสามมิติแบบทันที มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น อุปกรณ์แสดงภาพสามมิติพอแบ่งออกได้เป็นสามลักษณะคือ แบบโฮโลกราฟิกส์ (Holographics) แบบหลายระนาบ (Multi-planar) และ แบบภาพคู่สเตอริโอ (Stereo pair)

โฮโลแกรม

โฮโลแกรม (Hologram) เห็นจะเป็นการแสดงภาพสามมิติที่เป็นที่คุ้นเคยกันโดยทั่วไป ตัวอย่างเช่นรูปที่ปรากฏอยู่บนบัตรเครดิตทั่วไป ในการสร้างภาพโฮโลแกรม (Hologram) นั้น ผู้สร้างจะทำการบันทึกรูปแบบการแทรกซ้อนที่เกิดจากลำแสงเลเซอร์สองลำ ที่ยิงจากแหล่งเดียวกันลงบนสื่อบันทึกภาพความละเอียดสูง ลำแสงหนึ่งยิงตรงเข้าหาสื่อบันทึกภาพ ในขณะที่อีกลำแสงหนึ่งสะท้อนจากวัตถุและเกิดการแทรกซ้อนกับลำแสงอ้างอิงลำแรก รูปแบบการแทรกซ้อนของลำแสงนี้เอง ที่เอื้ออำนวยการสร้างภาพสามมิติของวัตถุนั้นในภายหลังได้ ผู้มองสามารถโยกย้ายมุมมอง เพื่อเปลี่ยนมุมมองการเห็นภาพสามมิติของวัตถุได้ อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีทางด้านโฮโลแกรมยังก้าวไปไม่ถึงจุดที่เอื้ออำนวยการแสดงภาพแบบทันทีได้ เนื่องจากต้องการความเร็วของการประมวลผลที่สูง

หลายระนาบ

การแสดงภาพแบบหลายระนาบนั้น จะใช้การแบ่งวัตถุออกเป็นร้อยๆ หรืออาจเป็นพันๆ ระนาบ (เหมือนกับที่ใช้ในเครื่อง CAT scan) จากนั้นทำการวาดจุดต่างๆ ของวัตถุในแต่ละระนาบ โดยทั่วไประบบการแสดงภาพแบบนี้จะใช้กระจกสะท้อนจุดที่วาดจากแสงเลเซอร์ หรือจากหลอดภาพ ตัวอย่างเช่นเทคนิคการใช้กระจกแปรจุดรวม (Varifocal Mirror Technique) จะทำการแบ่งภาพสามมิติออกเป็น หลายพันระนาบ จากนั้นวาดจุดต่างๆบนแต่ละระนาบด้วยหลอดภาพ แล้วใช้กระจกโค้งที่สั่นด้วยความถี่ 30Hz สะท้อนภาพจากหลอดภาพเข้าสู่ตาผู้มอง ตัวรับภาพในตามนุษย์จะจดจำภาพที่มองเห็นในช่วงเวลาต่างๆ (Temporal Persistent) ดังนั้นภาพที่เห็นจากกระจกที่เลื่อนได้ (อย่างรวดเร็ว) จะทำให้โสตประสาทการมองเห็นของมนุษย์รวมภาพต่างๆ (ในแต่ละระนาบ) เข้าด้วยกันจนเกิดการรับรู้ภาพสามมิติที่มีปริมาตร (volume image) ภาพสามมิติที่แสดงด้วยวิธีนี้จะเป็นภาพที่โปร่งใสและมีเพียงสีเดียว

ภาพคู่สเตอริโอ

เทคนิคการแสดงภาพคู่สเตอริโอนี้คือ การแสดงภาพที่เหมาะสมสำหรับตาทั้งสอง นั่นคือแสดงภาพๆ หนึ่งสำหรับตาซ้าย และอีกภาพหนึ่งสำหรับตาขวา ถ้าภาพทั้งสองมีความแตกต่างกันของระยะวัตถุตามแนวนอน จะทำให้ผู้มองรับรู้ความลึกของวัตถุจากความแตกต่างของระยะวัตถุดังกล่าว เทคนิควิธีการแสดงภาพทั้งสองนี้ แบ่งออกได้เป็น การแสดงภาพคู่พร้อมกัน (Time-parallel) และการแสดงภาพคู่สลับเชิงเวลา (Time-multiplexed)

การแสดงภาพคู่พร้อมกันที่เป็นที่รู้จักกันมากคือกล้องดูรูปภาพนิ่งการ์ตูนสามมิติ ViewMaster ผู้มองมองผ่านช่องมองสองช่อง แต่ละช่องจะมีภาพสองภาพสำหรับตาแต่ละข้าง อีกวิธีหนึ่งที่เป็นที่รู้จักคือการแสดงภาพยนตร์สามมิติในสมัยก่อน ซึ่งใช้วิธีที่เรียกว่า Anaglyph ที่แสดงภาพสำหรับตาทั้งสองบนจอภาพพร้อมๆกัน โดยใช้สีที่ต่างกันสำหรับภาพทั้งสอง เช่นสีแดงกับสีเขียว เป็นต้น โดยที่ผู้มองจะต้องสวมแว่นที่มีตัวกรองสีเขียวและแดง วิธีนี้มีปัญหาเรื่องภาพหลอน เนื่องจากตัวกรองแสงไม่สามารถกรองแสงได้หมดจริง จึงทำให้เกิดการรับภาพสำหรับตาอีกข้างหนึ่งด้วย การแสดงภาพยนตร์สามมิติแบบ Anaglyph นี้ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้น ด้วยการฉายภาพจากกล้องฉายสองกล้องผ่านแผ่นกรองบังคับทิศทางที่ต่างกันของคลื่นแสง โดยที่ทิศทางคลื่นของการฉายภาพทั้งสองจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน แว่นกรองทิศทางที่ผู้ชมสวมจะกรองทิศของคลื่นที่ต่างๆ สำหรับตาทั้งสอง ดังนั้นแผ่นกรองจะกั้นภาพที่ไม่ตรงทิศออกได้

การแสดงภาพคู่สลับเชิงเวลา มีหลักการทำงานคือการแสดงภาพสำหรับตาซ้ายในขณะที่เปิดตาซ้ายแต่ปิดตาขวา สลับกับการแสดงภาพตาขวาในขณะที่เปิดตาขวาแต่ปิดตาซ้าย หากการสลับดังกล่าวกระทำได้ในเวลาอันสั้น โสตประสาทการรับรู้จะสามารถรวมภาพทั้งสองและรับรู้ความลึกได้ การปิด-เปิดตากระทำได้ในสองลักษณะคือ การใช้แว่นแบบ Active กับแบบ Passive สำหรับแบบ Active นั้นตัวแว่นเองจะทำการเปิดหรือบังการมองของนัยน์ตา โดยการใช้แว่นที่ทำจากผลึกเหลวที่สามารถกั้นหรือยอมให้แสงผ่านตามลักษณะสัญญาณที่ป้อนเข้าตัวแว่น การเปิดหรือปิดแว่นนี้จะกระทำไปแบบประสานจังหวะไปกับการแสดงภาพตาซ้ายและขวาสลับกันบนจอภาพ สำหรับแว่นแบบ Passive นั้นการปิดเปิดภาพจะกระทำที่หน้าจอโดยที่ฉากหน้าจอภาพจะสามารถควบคุมทิศทางคลื่นแสงได้ โดยให้ภาพตาซ้ายและภาพตาขวาถูกแสดงสลับกันไป โดยมีคลื่นแสงที่ถูกบังคับทิศให้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ผู้ชมก็เพียงสวมแว่นกรองทิศคลื่น ในลักษณะเดียวกันกับการชมภาพยนตร์สามมิติ

เทคนิคการใช้ภาพคู่สเตอริโอนี้จะมีราคาย่อมเยาว์ที่สุด วิธีนี้สามารถใช้ภาพสีเหมือนจริงที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิคทางคอมพิวเตอร์อื่นๆได้ แต่ส่วนเสียก็คือจะมีผู้มองอยู่จำนวนหนึ่งที่ไม่รับรู้ความมีมิติของภาพที่สร้างขึ้นโดยใช้เทคนิคนี้ เรียกว่าบอดภาพคู่สเตอริโอ (Stereo Blindness)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อทำการพัฒนาโปรแกรมแสดงภาพสเตอริโอ 3 มิติที่มีลักษณะดังนี้

1. เป็นโปรแกรมที่สามารถใช้แสดงภาพสเตอริโอ 3 มิติ โดยใช้หลักการสลับภาพเชิงเวลา
2. ทำงานภายใต้ไมโครซอฟต์ วินโดวส์ (Microsoft Windows)
3. สามารถทำงานได้ทั้งแบบแยกเดี่ยว (Stand Alone) หรือทำงานร่วมกับโปรแกรมอื่น โดยกระทำตัวเป็นผู้ให้บริการแสดงภาพสเตอริโอ 3 มิติ จากข้อมูลที่โปรแกรมอื่นเป็นผู้ส่งมอบให้ โดยติดต่อเชื่อมโยงผ่านระบบข้อความ (Message)
4. สามารถทำงานร่วมกับการ์ดแสดงผล (Display card) ได้โดยผ่าน ทางโปรแกรม UNIVBE*

ขอบเขตของการวิจัย

โครงการนี้มีขึ้นเพื่อพัฒนาโปรแกรมแสดงภาพสเตอริโอ 3 มิติ ที่มีคุณสมบัติตามที่ระบุไว้ในวัตถุประสงค์ของการวิจัย โดยที่โปรแกรมที่ได้จากการพัฒนาครั้งนี้ จะสามารถทำงานภายใต้ข้อกำหนดต่อไปนี้

1. ทำงานได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ไอบีเอ็ม พีซี (IBM PC Computer) หรือเครื่องเทียบเคียง ที่มีหน่วยประมวลผลกลางเป็นรุ่น 80386 ขึ้นไป, มีหน่วยความจำหลัก อย่างน้อย 2 MB. มีการ์ดแสดงผลชนิดซุปเปอร์วีจีเอ (Super VGA) ที่มีหน่วยความจำอย่างน้อย 512 KB. มีฮาร์ดดิสก์(Hard Disk) ที่มีพื้นที่ว่างอย่างน้อย 8 MB. และมีฟลอปปี้ดิสก์ (Floppy Disk) อย่างน้อย 1 ตัว
2. ทำงานภายใต้ไมโครซอฟต์ วินโดวส์ รุ่น 3.1 ขึ้นไป
3. ทำงานได้ในสภาวะความละเอียดของการแสดงผล 640x480 และ 800 x 600 จุด 16 สี
4. ในการทดสอบการแสดงภาพโครงเส้นชนิดเคลื่อนไหวได้ (Wire Frame Animation) ใช้แฟ้มข้อมูลประเภท .3D และ .3DV เป็นแฟ้มข้อมูลทดสอบ (โครงสร้างแฟ้มแสดงไว้ในภาคผนวก ก.)
5. ในการแสดงภาพโครงเส้นชนิดเคลื่อนไหวได้ จำกัดอยู่ที่การหมุน (Rotation) และการย้ายตำแหน่ง (Translation)
6. ใช้หลักการฉายภาพแบบนอกแกน

---

* ดูรายละเอียดเพิ่มเติมใน บทที่ 6 หน้า 82

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
   1.1. การแสดงผลสเตอริโอ 3 มิติแบบภาพสลับเชิงเวลา
   1.2. การคำนวณภาพฉายแบบสเตอริโอ 3 มิติ
   1.3. การทำงานของการ์ดแสดงผลชนิดซุปเปอร์วีจีเอ
   1.4. การทำงานของแว่นผลึกเหลว
   1.5. วิธีการเขียนโปรแกรมภายไมโครซอฟต์วินโดวส์
   1.6. วิธีการสร้างชุดคำสั่งเพื่อรองรับการขัดจังหวะแบบเวลาจริง (Real Time Interrupt) ภายใต้ไมโครซอฟต์ วินโดวส์
2. ออกแบบโปรแกรมแสดงภาพสเตอริโอสลับเชิงเวลาที่ทำงานภายใต้ไมโครซอฟต์วินโดวส์
3. พัฒนาโปรแกรม
4. ทดสอบและแก้ไขปรับปรุงโปรแกรม
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลที่คาดว่าจะได้รับ

โครงการจะก่อให้เกิดประโยชน์ดังนี้

1. เป็นระบบการแสดงภาพสเตอริโอ 3 มิติ แบบโครงเส้นชนิดเคลื่อนไหวได้โดยใช้การสลับภาพเชิงเวลาที่ทำงานภายใต้ไมโครซอฟต์ วินโดวส์
2. ก่อให้เกิดฐานความรู้เกี่ยวกับเทคนิคต่างๆ ของการแสดงภาพสเตอริโอ 3 มิติในแบบโครงเส้น
3. ก่อให้เกิดฐานความรู้เกี่ยวกับการทำงานของการ์ดแสดงผลซุปเปอร์วีจีเอในส่วนของการสร้างบัฟเฟอร์แสดงผลคู่ (Double Frame Buffer) และการสลับภาพ (Display Page Swapping)
4. เป็นโครงการต้นแบบที่จะทำให้เกิดการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ในลักษณะที่ก้าวหน้าขึ้นเช่น การพัฒนาระบบความจริงเสมือน (Virtual Reality) ที่ทำงานภายใต้ไมโครซอฟต์วินโดวส์
5. ทำให้การพัฒนาโปรแกรมในด้านนี้สามารถพึ่งตนเองได้ในระดับหนึ่ง และประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อโปรแกรมจากต่างประเทศ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุรเดช สามะบุตร และ จีรวุธ คงอ่อน ได้ทำการวิจัยและจัดสร้างระบบแสดงผลสเตอริโอแบบภาพสลับเชิงเวลา ที่ทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการดอส ขึ้นในปี พ.ศ. 2535 โดยใช้ชื่อโครงงานว่า Three dimension stereoscopics visualization ระบบดังกล่าวประกอบด้วย แว่นผลึกเหลวพร้อมชุดควบคุม และ โปรแกรมสำหรับแสดงภาพโครงเส้นแบบเคลื่อนไหวได้จากแฟ้มข้อมูลประเภท .3D และ .3DV

ในปีต่อมาวรุฒม์ ทวีทรัพย์ และ ทัชพล ไทยทองสุข ได้ทำการวิจัยต่อเนื่องจากโครงงานดังกล่าวเพื่อทำการจัดสร้างโปรแกรมแสดงภาพสเตอริโอระบบให้สามารถทำงานได้ภายใต้สภาพปฏิบัติการไมโครซอฟต์วินโดวส์ โดยใช้ชื่อโครงงานว่า 3DWIN แต่โครงงานที่ได้นี้ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย