

การออกแบบและพัฒนาแอนิเมชัน 3 มิติท่าแม่ไม้มวยไทยด้วยการควบคุม

การเคลื่อนไหวตัวละครแบบ inverse kinematics

Design and development of Muay Thai posture 3D animation

by controlling the inverse kinematics movement

กานต์ คุ่มภัย^{1*} ธนัท แสงกิ่ง¹ และ ปณัฏดา ไชบุญลือ¹

Karn Kumpai^{1*}, Thanut Sangking¹ and Panadda Jaibun-lue¹

บทคัดย่อ

การควบคุมการเคลื่อนไหวตัวละครแอนิเมชันเป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการผลิตแอนิเมชันที่มีความสำคัญ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาหลักการเคลื่อนที่ของข้อต่อจุดหมุนแขนหุ่นยนต์แบบ inverse kinematics เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนไหวตัวละครแอนิเมชันในการทำท่าแม่ไม้มวยไทย มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อประเมินคุณภาพการออกแบบและพัฒนาแอนิเมชัน 3 มิติ ที่มีการควบคุมการเคลื่อนไหวท่าแม่ไม้มวยไทยของตัวละครแบบ inverse kinematics 2) เพื่อศึกษาความพึงพอใจที่มีต่อแอนิเมชัน 3 มิติ เรื่อง The secret weapons ผลการวิจัยพบว่า 1) ได้ผลงานแอนิเมชัน 3 มิติท่าแม่ไม้มวยไทยที่มีการควบคุมการเคลื่อนไหวตัวละครแบบ inverse kinematics เรื่อง The secret weapons ที่มีคุณภาพ โดยแยกเป็นผลการประเมินด้านองค์ประกอบภาพเคลื่อนไหวสำหรับงานแอนิเมชัน 3 มิติ และผลการประเมินคุณภาพด้านเทคนิคการควบคุมการเคลื่อนไหวท่าแม่ไม้มวยไทยของตัวละครแบบ inverse kinematics อยู่ในระดับมาก 2) ผลความพึงพอใจที่มีต่อแอนิเมชัน 3 มิติ เรื่อง The secret weapons อยู่ในระดับมาก

คำสำคัญ: แอนิเมชัน 3 มิติ แม่ไม้มวยไทย inverse kinematics

Abstract

Controlling the movement of the animation characters is an important step in the animation production process. The article emphasized on study the joint rotation robot arm inverse kinematics principles to apply the controlling of Muay Thai posture animation characters. The objectives of this research were: 1) To evaluate the quality of design and development of Muay Thai posture 3D animation by controlling the inverse kinematics movement; and 2) To study the satisfaction with 3D animation named "The secret weapons". The results of the research were as follows: 1) The completed quality Muay Thai posture 3D animation by controlling the inverse kinematics movement divided into the results of design and development of animation composition for 3D animation and the result of inverse kinematics character motion control technique were at high level. 2) The satisfaction of this 3D animation was at high level.

Keywords: 3D animation, Muay Thai, inverse kinematics

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

¹ Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

* Corresponding author. E-mail: karn.ku@bsru.ac.th

บทนำ

กระบวนการสร้างการควบคุมการเคลื่อนไหวตามข้อต่อจุดหมุนบนร่างกายตัวละคร มีความสำคัญในกระบวนการพัฒนาแอนิเมชัน 3 มิติ เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ผู้พัฒนาแอนิเมชันทำการกำหนดจุดหมุนข้อต่อตามตำแหน่งที่ถูกต้องตามระบบร่างกายมนุษย์บนตัวละครแอนิเมชันเพื่อให้การเคลื่อนไหวท่าทางตัวละครนั้นสามารถสื่อสารความหมายได้อย่างถูกต้องสอดคล้องกับข้อคิดเห็นของ Panyawan (2019) กล่าวว่าการสร้างแอนิเมชันนั้น การเคลื่อนไหวในส่วนต่าง ๆ ของตัวละครเป็นสิ่งที่สำคัญมาก โดยขึ้นส่วนหรือข้อต่อในส่วนต่าง ๆ ต้องมีความสัมพันธ์กัน เช่น นิ้วกับมือ ใบหน้ากับปากหรือตา หัวกับคอ แขนกับข้อศอก เป็นต้น ร่วมกับค้นหาวิธีการควบคุมการเคลื่อนไหวของตัวละคร โดยมักใช้เวลาในการพัฒนานานเมื่อเทียบกับทุกกระบวนการปฏิบัติการแอนิเมชันเนื่องจากการทำงานในขั้นตอนนี้ผู้พัฒนาต้องใช้ประสบการณ์ในการทำงานแอนิเมชันที่หลากหลาย ใช้ความรู้ ความเข้าใจในการแก้ปัญหาและค้นคว้าข้อมูลเพื่อนำมาเป็นการอ้างอิงการควบคุมการเคลื่อนไหวของตัวละครให้ตรงตามต้นแบบ รวมไปถึงต้องสามารถวิเคราะห์ลักษณะและเทคนิคที่ใช้เพื่อลดปัญหาและลดระยะเวลาในการทำงานแอนิเมชัน โดยที่การทำงานนี้ไม่มีกฎการทำงานที่เป็นมาตรฐาน ไม่มีวิธีที่ตายตัว หากแต่เป็นการใช้ประสบการณ์การทำงานด้านแอนิเมชันวิเคราะห์ และทดลองใช้เทคนิคที่แตกต่างกันโดยเปลี่ยนวิธีการทำงานเพื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการทำงานควบคุมกับผลลัพธ์ที่ได้ เพื่อหาข้อสรุปว่าเทคนิคใดที่มีความเหมาะสมกับการเคลื่อนไหวในลักษณะใด โดยเทคนิคนั้น

สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวของตัวละครได้มีคุณภาพหรือไม่ โดยผู้วิจัยได้ศึกษาและนำลักษณะการทำงานของระบบแขนหุ่นยนต์ที่มีมอเตอร์ช่วยในการหมุนขับเคลื่อนให้แขนหุ่นยนต์ขยับไปตามตำแหน่งท่าทางที่ต้องการ ประยุกต์กับตัวละครแอนิเมชันที่มีข้อต่อจุดหมุนของร่างกายอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงมนุษย์ สอดคล้องกับ Sutapan, & Sangveraphunsiri (2017) มีการนำระบบแขนกลหุ่นยนต์โครงร่างภายนอกแบบสวมใส่มาใช้ประกอบกับแขนมนุษย์เพื่อสร้างการควบคุมการหมุนข้อต่อหัวไหล่และข้อศอกเพื่อช่วยในการเคลื่อนที่ร่างกายของผู้ป่วยในการงอหัวไหล่และข้อศอก

เพื่อหาวิธีการทำงานที่ดีที่สุดเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนไหวของตัวละครแอนิเมชัน โดยระบบแขนหุ่นยนต์ที่มีข้อต่อแบบหมุนนั้นแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ 1) forward kinematics คือการหาค่าตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์เมื่อกำหนดมุมของมอเตอร์ทุกตัวที่มีผลต่อการเคลื่อนไหว และ 2) inverse kinematics คือการหามุมของมอเตอร์ทุกตัวที่มีผลต่อการเคลื่อนไหวเมื่อกำหนดตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ สอดคล้องกับ Poodchakarn, Thongsard, Sae-eaw, Lim, & Primee (2012) กล่าวว่าตำแหน่งของวัตถุสามารถบอกได้จากตำแหน่งของจุดที่อยู่บนวัตถุ ประกอบกับตำแหน่งเชิงมุมของวัตถุนั้น งานวิจัยนี้จะนำหลักการ inverse kinematics ประยุกต์ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนไหวตัวละครแอนิเมชัน โดยการกำหนดตำแหน่งปลายทางของการเคลื่อนที่ตัวละครในท่าทางที่ต้องการ โดยที่ไม่ต้องหมุนข้อต่อจุดหมุนทุกอันเพื่อจัดทำทางนั้น แตกต่างกับหลักการ forward kinematics ที่ต้องหมุนข้อต่อจุดหมุนทุกอันจาก

จุดหมุนต้นทางไปยังตำแหน่งปลายทางตามลำดับ เพื่อจัดทำทางนั้นซึ่งจะใช้เวลาในการทำงานมากกว่า เนื่องจากต้องหมุนทุกข้อต่อแบบเรียงลำดับ สอดคล้องกับ Panomruttanarug, Pomsukvittoon, & Pakkawanit (2017) ได้กล่าวว่า inverse kinematics นั้นสามารถสั่งงานหุ่นยนต์แขนกลให้มีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการโดยการป้อนพิกัดจุดปลายทางเข้าไปให้หุ่นยนต์ แขนกลทำการคำนวณมุมในแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์ เพื่อเคลื่อนที่ไปยังทิศทางที่ต้องการได้โดยตรง จึงเป็นการลดขั้นตอนในการทำงาน และเพื่อเป็นการสร้างขีดจำกัดในการเคลื่อนที่ของข้อต่อให้เกิดการหมุนพับทางเดียวโดยที่จะทำการซึ่ง ยึดให้การหมุนพับและเหยียดตั้งอยู่ในระยะทางเดิม เปรียบเทียบได้กับการทำงานของจุดหมุนข้อต่อร่างกายตัวละครแอนิเมชัน เช่น หัวไหล่ ข้อศอก ข้อมือ โดยข้อต่อแบบหมุนของหุ่นยนต์นั้นสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระโดย (x, y, z) คือตำแหน่งที่มือจับขึ้นไปเทียบกับฐาน จะสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์กันระหว่างมุมของมอเตอร์ โดยสมมุติว่ามีมอเตอร์ 5 ตัว ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$) กับตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ (x, y, z) ความสัมพันธ์นี้แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ 1) forward kinematics คือการกำหนดมุมของมอเตอร์ทั้ง 5 ตัว ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$) ตามลำดับ จากมอเตอร์ต้นทางไปยังปลายทาง เพื่อให้ตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ (x, y, z) อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ และ 2) inverse kinematics คือการกำหนดตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ (x, y, z) และทำการหามุมของมอเตอร์ทั้ง 5 ตัว ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$) ที่ทำงานร่วมกันจนส่งผลให้ตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ตรงตามตำแหน่งนั้น

เมื่อนำหลักการการควบคุมการหมุนของจุดหมุนแบบ forward kinematics มาใช้กับการควบคุมการเคลื่อนไหวให้กับตัวละคร โดยหากต้องการให้ตัวละครยกแขนซ้ายขึ้น จะต้องทำการหมุนจุดหมุนที่ 1 จุดหมุนที่ 2 และ จุดหมุนที่ 3 ตามลำดับ ทั้งหมด 3 จุดหมุน เพื่อให้ตำแหน่งปลายแขนตรงตามตำแหน่งที่ต้องการให้ตัวละครเคลื่อนไหว พบว่าการควบคุมจุดหมุนตามข้อพับบนร่างกายเพื่อให้ตัวละครแสดงท่าทางแม้มันวุ่นวายนั้นมีความละเอียดสูงในการควบคุมท่าทางให้แม่นยำตามที่ต้องการ แต่ใช้เวลาในการทำงานมากกว่าแบบ inverse kinematics มากพอสมควร เนื่องจากการควบคุมจากต้นทางไปยังปลายทางทีละข้อต่อโดยเรียงลำดับ ดัง (Figure 1)

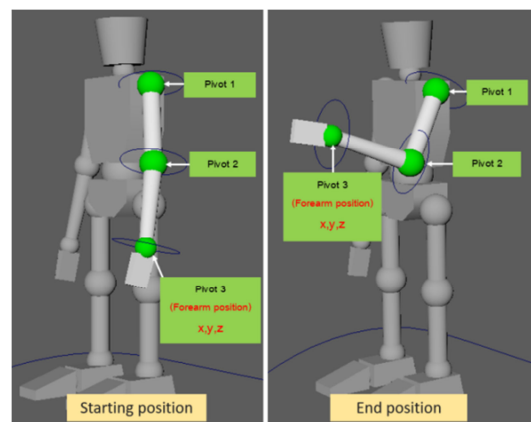


Figure 1 Defining and controlling the rotation of the pivot point by forward kinematics.

เมื่อนำหลักการการควบคุมการหมุนของจุดหมุนแบบ inverse kinematics โดยการกำหนดข้อต่อจุดหมุนตัวละครตามตำแหน่งข้อต่อจุดหมุนบนร่างกายตัวละคร จากนั้นใช้คำสั่ง create IK handle

เพื่อกำหนดตำแหน่งปลายแขน และหากต้องการให้ตำแหน่งปลายแขนอยู่ในตำแหน่งใดก็สามารถย้ายตำแหน่งปลายทางได้เลยโดยที่ไม่จำเป็นต้องกำหนดค่าการหมุนให้จุดหมุนที่ 1 จุดหมุนที่ 2 และจุดหมุนที่ 3 เนื่องจากส่วนประมวลผลซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์จะทำหน้าที่หาค่าการหมุนของจุดหมุน

ทั้งหมดให้ ดัง (Figure 2) แสดงภาพการควบคุมตำแหน่งปลายทางของตัวละครโดยการเปลี่ยนตำแหน่งปลายแขนของการควบคุม และผลการใช้คำสั่ง create IK handle เพื่อสร้างการควบคุมตัวละครแบบ inverse kinematics ในตัวละครแอนิเมชัน

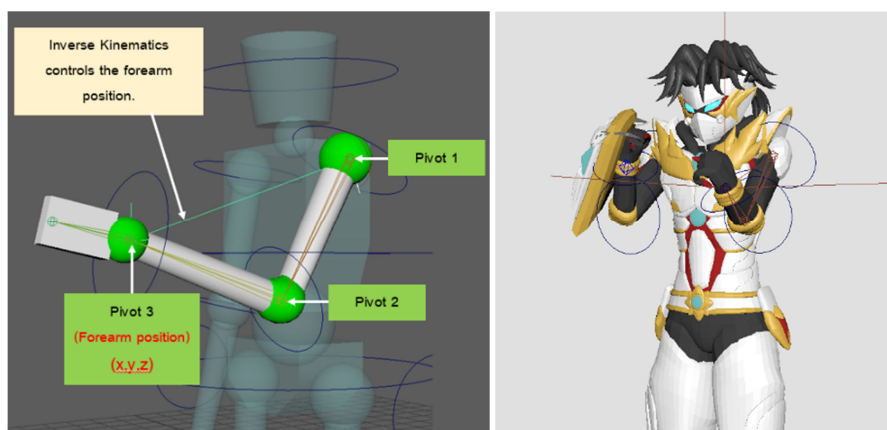


Figure 2 Defining and controlling the rotation of the pivot point by inverse kinematics.

จากเหตุผลข้างต้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาแอนิเมชัน 3 มิติท่าแม่ไม้มวยไทยที่เป็นส่วนหนึ่งในการเรียนรายวิชาแอนิเมชัน 3 มิติ ด้วยการควบคุมการเคลื่อนไหวตัวละครแบบ inverse kinematics โดยตัวละครในแอนิเมชันเรื่องนี้เป็นตัวละครที่มีสัดส่วนตรงกับมนุษย์ จึงมีการกำหนดตำแหน่งของข้อต่อ จุดหมุนให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกับมนุษย์ ควบคู่กับการใช้เทคนิคการควบคุมตัวละครเพื่อบังคับการเคลื่อนไหวส่วนแขนและขาตัวละคร ซึ่งผู้วิจัยเชื่อว่าเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อลดขั้นตอน ลดระยะเวลาในการทำงาน และลดโอกาสการทำงานที่ผิดพลาดในการ

ควบคุมท่าทางมวยไทยของตัวละครตามข้อมูลท่าทางแม่ไม้มวยไทยที่ผู้วิจัยได้ค้นคว้ามาโดยผู้วิจัยให้ความสำคัญกับความถูกต้องของท่าทางแม่ไม้มวยไทยเพื่อใช้พัฒนาเป็นสื่อแอนิเมชันที่มีเนื้อหาในการอนุรักษ์ ประเพณี ศิลปะ และวัฒนธรรมไทยด้านแม่ไม้มวยไทยให้เยาวชนได้รับรู้และตระหนักถึงความสำคัญของศาสตร์การต่อสู้ของไทยต่อไป งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์

- 1) เพื่อประเมินคุณภาพการออกแบบและพัฒนาแอนิเมชัน 3 มิติ ที่มีการควบคุมการเคลื่อนไหวท่าแม่ไม้มวยไทยของตัวละครแบบ inverse kinematics
- 2) เพื่อศึกษาความพึงพอใจที่มีต่อแอนิเมชัน 3 มิติ เรื่อง The secret weapons

วิธีการศึกษา

1. ประเภทของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นวิจัยเชิงทดลอง เพื่อนำผลการวิจัยสร้างเป็นกฎเกณฑ์หรือวิธีการปฏิบัติงาน และวิเคราะห์ค้นหาข้อบกพร่องและประเด็นปัญหาของการทำงาน เพื่อปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ตัวแปรต้น คือ การใช้หลักการเคลื่อนที่แบบขนานแบบ inverse kinematics ควบคุมตัวละครแอนิเมชัน ตัวแปรตามคือ ผลประเมินคุณภาพและความพึงพอใจของแอนิเมชัน 3 มิติ ที่มีการควบคุมการเคลื่อนไหวท่าแม่ไม้มวยไทยของตัวละครแบบ inverse kinematics

2. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร คือประชากรที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ นักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาแอนิเมชัน และดิจิทัลมีเดีย คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ปีการศึกษา 2563 จำนวน 121 คน

กลุ่มตัวอย่าง ได้มาโดยการเลือกแบบเจาะจง เป็นนักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาแอนิเมชัน และดิจิทัลมีเดีย คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ชั้นปีที่ 3 ที่เรียนรายวิชาแอนิเมชัน 3 มิติ ปีการศึกษา 2563 จำนวน 28 คน

3. เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

3.1 แบบประเมินคุณภาพการออกแบบและพัฒนาแอนิเมชัน 3 มิติ ที่มีการควบคุมการเคลื่อนไหวท่าแม่ไม้มวยไทยของตัวละครแบบ inverse kinematics สำหรับผู้เชี่ยวชาญ แบ่งเป็น แบบประเมินคุณภาพด้านองค์ประกอบภาพเคลื่อนไหวสำหรับงานแอนิเมชัน 3 มิติ และแบบประเมินคุณภาพด้านเทคนิคการควบคุม

การเคลื่อนไหวท่าแม่ไม้มวยไทยของตัวละครแบบ inverse kinematics ที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือด้วยการหาค่าสัมประสิทธิ์ความสอดคล้อง (IOC) จากผู้เชี่ยวชาญ 3 คน มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 0.67-1.00 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ ข้อมูลคือ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.2 แบบประเมินความพึงพอใจที่มีต่อแอนิเมชัน 3 มิติ เรื่อง The secret weapons ที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือด้วยการหาค่าสัมประสิทธิ์ความสอดคล้อง (IOC) จากผู้เชี่ยวชาญ 3 คน มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 0.67-1.00 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ ข้อมูลคือ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4. การเก็บรวบรวมข้อมูล

การวิจัยการออกแบบและพัฒนาแอนิเมชัน 3 มิติท่าแม่ไม้มวยไทยด้วยการควบคุมการเคลื่อนไหวตัวละครแบบ inverse kinematics ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีการในการเก็บรวบรวมข้อมูล และลำดับขั้นตอนการทำงาน ด้วยการดำเนินการวิจัย ดัง (Figure 3)

4.1 ขั้นตอนก่อนการผลิต เป็นขั้นตอนการรวบรวมและวิเคราะห์เนื้อหาและข้อมูลเพื่อการออกแบบโครงเรื่อง ตัวละคร ฉาก และแอนิเมชัน

4.2 ขั้นตอนการผลิต เป็นการใช้เครื่องมือพัฒนาด้านเทคนิค แบ่งเป็น 2 ระยะ คือระยะที่ 1 พัฒนาแบบจำลองตัวละครและฉาก 3 มิติ และระยะที่ 2 เตรียมการควบคุมการเคลื่อนไหวตัวละคร และสร้างแอนิเมชัน 3 มิติ ให้ตัวละครและฉาก โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษาข้อมูลแม่ไม้มวยไทยในท่าหนุมานถวายแหวน และจะเข้าพาดทาง โดยศึกษาท่าทางการเตรียมพร้อม และการออกอาวุธจากต้นฉบับที่สาธิตโดยใช้นักมวยที่เป็นมนุษย์ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และสอบถาม

จากผู้ที่มีความเกี่ยวข้องหรือมีประสบการณ์ เพื่อควบคุมการใช้แขน ขา เท้า และหมัดของตัวละคร แอนิเมชัน สอดคล้องกับ Phunsa (2019) กล่าวว่า ท่าแม่ไม้มวยไทย เป็นการผสมผสานการใช้ หมัด เท้า

เข่า ศอก เพื่อการรุก หรือรับในการต่อสู้ด้วยมวยไทย ประกอบไปด้วยแม่ไม้มวยไทยทั้งหมด 30 ท่า โดยในงานวิจัยนี้ตัวละครแอนิเมชันจะมีการทำท่าจะเข้ ฟาดหาง และหนุมานถวายเป็น

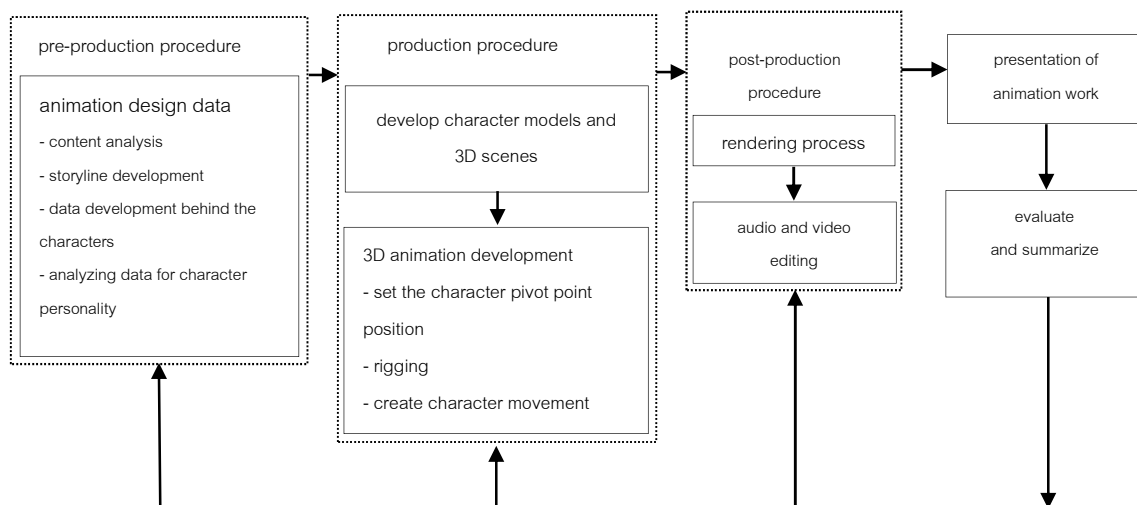


Figure 3 Diagrams show the research procedure.

4.3 ขั้นตอนหลังการผลิตเป็นการประมวลผลภาพในรูปแบบภาพเคลื่อนไหวและทำการตัดต่อภาพและเสียง

5. ขั้นการหาคุณภาพ นำผลการออกแบบและพัฒนาแอนิเมชัน 3 มิติท่าแม่ไม้มวยไทยด้วยการควบคุมการเคลื่อนไหวตัวละครแบบ inverse kinematics ไปให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 คน แบ่งเป็นแบบประเมินคุณภาพด้านองค์ประกอบภาพเคลื่อนไหวสำหรับงานแอนิเมชัน 3 มิติ และแบบประเมินคุณภาพด้านเทคนิคการควบคุมการเคลื่อนไหวท่าแม่ไม้มวยไทยของตัวละครแบบ inverse kinematics จากนั้นนำข้อคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญและนำไปปรับปรุงแก้ไข

6. ขั้นการหาผลความพึงพอใจ นำผลการพัฒนาแอนิเมชัน 3 มิติ เรื่อง The secret weapons นำเสนอต่อกลุ่มตัวอย่างจำนวน 28 คน เพื่อประเมินหาผลความพึงพอใจที่มีต่อแอนิเมชัน 3 มิติ เรื่อง The secret weapons

ผลการศึกษา

1. ผลการออกแบบและพัฒนาแอนิเมชัน 3 มิติท่าแม่ไม้มวยไทย ด้วยการควบคุมการเคลื่อนไหวตัวละครแบบ inverse kinematics เรื่อง The secret weapons

1.1 ผู้วิจัยวิเคราะห์ ออกแบบและพัฒนาโครงเรื่อง ข้อมูลเบื้องต้นหลังตัวนำไปออกแบบเป็นข้อมูล

บุคลิกลักษณะตัวละครเพื่อสร้างเป็นคาแรคเตอร์ซีตตัวละครแอนิเมชัน เรื่อง The secret weapons ดัง (Figure 4)

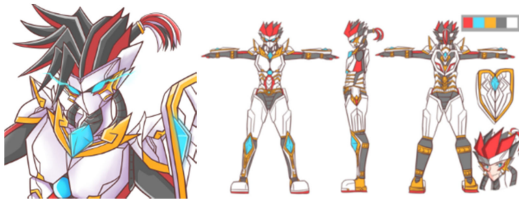


Figure 4 Character sheet of the 3D characters.

1.2 ผู้วิจัยนำแนวคิดทฤษฎีการใช้เครื่องมือพัฒนาแบบจำลองตัวละคร 3 มิติ ร่วมกับข้อมูลการออกแบบตัวละครคาแรคเตอร์ซีตพัฒนาเป็นแบบจำลองตัวละคร 3 มิติ ที่มีความเหมาะสมต่อการดำเนินเรื่อง โดยผลการออกแบบและพัฒนาตัวละครแอนิเมชัน 3 มิติ เรื่อง The secret weapons ดัง (Figure 5)

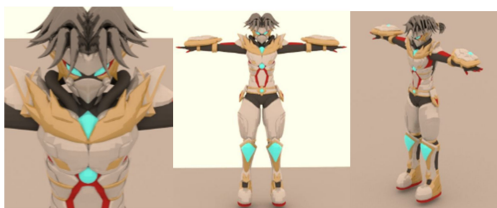


Figure 5 3D character models.

1.3 ผลการนำ inverse kinematics มาประยุกต์ใช้ควบคุมการเคลื่อนไหวให้ตัวละครแอนิเมชัน โดยใช้ควบคุมส่วนแขนในการพับข้อศอก ส่วนขาในการยกเท้า งอเข่า และส่วนลำตัวในการย่อและยืดร่างกายตัวละครแอนิเมชันเพื่อแสดงท่าทางมวยไทยตามบทบาทตัวละครนั้นประเด็นที่สำคัญจากการศึกษา

การคำนวณค่าการหมุนของมอเตอร์แขนหุ่นยนต์เพื่อกำหนดตำแหน่งปลายทางของแขนหุ่นยนต์ที่ต้องการแบบ inverse kinematics นั้น Spong, Hutchinson, & Vidyasagar (2006) ได้เสนอว่าในการคำนวณค่าการหมุนของมอเตอร์แบบ inverse kinematics อาจมีการคำนวณค่าการหมุนของมอเตอร์ที่แตกต่างกันได้โดยจะได้ผลลัพธ์ที่ตำแหน่งปลายแขนเดิมเช่นกัน โดยรูปร่างของแขนหุ่นยนต์อาจจะเป็นแบบ elbow up หรือ elbow down ดัง (Figure 6)

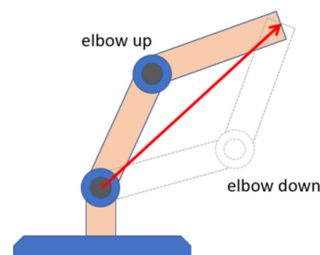


Figure 6 Multiple inverse kinematics solutions.
(Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2006)

เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการหมุนของข้อต่อผิดทิศทางผู้วิจัยกำหนดค่าเริ่มต้นให้ทิศทางในการหมุนจุดหมุนข้อพับให้หมุนในทิศทางที่ตรงกับการเคลื่อนไหวของมนุษย์และอยู่ภายในขีดจำกัดในการหมุนของข้อต่อ ตามหลักกายวิภาคระบบการเคลื่อนที่ของกระดูกข้อต่อ ตลอดจนขีดจำกัดการเคลื่อนที่ขององศาการงอและพับของข้อต่อบนร่างกาย เพื่อใช้หลักการ inverse kinematics ควบคุมการเคลื่อนไหวของตัวละครให้เกิดการเคลื่อนไหวท่าทางมวยไทยของตัวละครตรงตามต้นแบบและมีความเป็นธรรมชาติ โดยผลการวิเคราะห์ข้อต่อจุดหมุนของตัวละครและการใช้ inverse kinematics ควบคุมการ

เคลื่อนไหวของตัวละคร โดยการใช้ inverse kinematics ควบคุมการเคลื่อนไหวบริเวณแขน ข้อศอก ท่อนขา หัวเข่าและข้อเท้า ดัง (Figure 7)

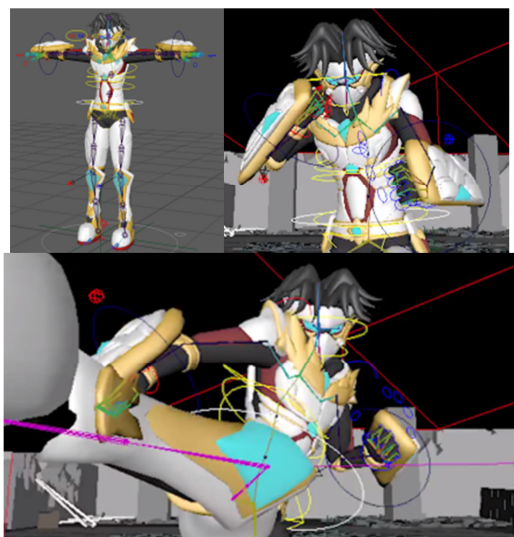


Figure 7 Using inverse kinematics techniques to control the movement of the characters.

1.4 ผลการออกแบบและพัฒนาแอนิเมชัน 3 มิติท่าแม่ไม้มวยไทย ด้วยการควบคุมการเคลื่อนไหวตัวละครแบบ inverse kinematics เรื่อง The secret weapons ที่ผ่านการจัดสภาพแสง ประมวลผลภาพตัดต่อภาพเคลื่อนไหวและเสียงเสร็จสมบูรณ์ ความยาว 1.47 นาที ดัง (Figure 8)



Figure 8 The results of 3D animation design and development of The secret weapons.

2. ผลการประเมินคุณภาพการออกแบบและพัฒนาแอนิเมชัน 3 มิติ ที่มีการควบคุมการเคลื่อนไหวท่าแม่ไม้มวยไทยของตัวละครแบบ inverse kinematics สำหรับผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน แบ่งเป็น รายด้านที่ 1 ประเมินคุณภาพด้านองค์ประกอบภาพเคลื่อนไหวสำหรับงานแอนิเมชัน 3 มิติ ประกอบไปด้วยการประเมินความเหมาะสมและความสมบูรณ์ของโครงเรื่อง การออกแบบตัวละครและฉาก 3 มิติ การจำลองสภาพแสง การจัดวางมุมกล้องและการตัดภาพ การจัดองค์ประกอบภาพเคลื่อนไหว และการใช้เสียงในงานแอนิเมชัน และรายด้านที่ 2 ประเมินคุณภาพด้านเทคนิคการควบคุมการเคลื่อนไหวตัวละครแบบ inverse kinematics ประกอบไปด้วยการประเมินคุณภาพและความเหมาะสมของไฟล์ก่อนโมเดลตัวละคร 3 มิติ การกำหนดข้อต่อจุดหมุนบนร่างกายตัวละคร การใช้ inverse kinematics ควบคุมตัวละครส่วนแขนและมือ การใช้ inverse kinematics ควบคุมตัวละครส่วนขาและเท้า การใช้ inverse kinematics ควบคุมลำตัวตัวละคร การใช้เส้นควบคุมจัดลำดับขั้นเพื่อควบคุมอวัยวะตัวละคร และจังหวะในการตัดภาพเคลื่อนไหวของตัวละคร โดยผลการประเมินปรากฏดัง (Table 1)

การแปลความหมายระดับการประเมินคุณภาพนำไปเทียบกับเกณฑ์ขอบเขตของค่าเฉลี่ยตามแนวคิดของบุญชม ศรีสะอาด ดังนี้ ค่าเฉลี่ย 4.51-5.00 หมายถึงมากที่สุด ค่าเฉลี่ย 3.51-4.50 หมายถึง มาก ค่าเฉลี่ย 2.51-3.50 หมายถึง ปานกลาง ค่าเฉลี่ย 1.51-2.50 หมายถึง น้อย และค่าเฉลี่ย 1.00-1.50 หมายถึง น้อยที่สุด

แบบประเมินผ่านการตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือที่ผ่านการหาค่าสัมประสิทธิ์ความสอดคล้อง (IOC) จากผู้เชี่ยวชาญ 3 คน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.87

Table 1 The results of 3D animation design and development quality assessments from the experts, divided into the quality assessment results of animation composition for 3D animation and the quality assessment results of inverse kinematics character motion control technique (n=3).

assessment side	$\bar{x}$	S.D.	results
1. the quality assessment results of animation composition for 3D animation	4.46	0.59	high
2. the quality assessment results of Inverse kinematics character motion control technique	4.38	0.58	high

จาก (Table 1) พบว่าความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญในการประเมินคุณภาพการออกแบบและพัฒนาแอนิเมชัน 3 มิติ ที่มีการควบคุมการเคลื่อนไหวท่าแม่ไม้มวยไทยของตัวละครแบบ inverse kinematics ด้านองค์ประกอบภาพเคลื่อนไหวสำหรับงานแอนิเมชัน 3 มิติ มีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.46 อยู่ในระดับมาก ($\bar{x}=4.46$, S.D.=0.59) โดยหัวข้อที่ได้รับการประเมินอยู่ในระดับมากที่สุด 3 ลำดับแรกคือความเหมาะสมของการจัดองค์ประกอบภาพเคลื่อนไหว ($\bar{x}=5.00$, S.D.=0.00) ความเหมาะสมและความสมบูรณ์ของโครงเรื่อง ($\bar{x}=4.67$, S.D.=0.58) และความเหมาะสมในการจัดวางมุมกล้องและการตัดภาพ ($\bar{x}=4.00$, S.D.=0.00) โดยหัวข้อที่ได้รับการประเมินต่ำที่สุดคือการออกแบบตัวละครและฉาก 3 มิติ ($\bar{x}=3.67$, S.D.=0.58) และคุณภาพด้านเทคนิคการควบคุมการเคลื่อนไหวตัวละครแบบ inverse kinematics มีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.38 อยู่ในระดับมาก ($\bar{x}=4.38$, S.D.=0.58) โดยหัวข้อที่ได้รับการประเมินอยู่ในระดับมากที่สุด 3 ลำดับแรกคือการใช้ inverse kinematics ควบคุมตัวละครส่วนขาและเท้า ($\bar{x}=5.00$, S.D.=0.00) การใช้ inverse kinematics ควบคุมตัวละครส่วนแขนและมือ

($\bar{x}=4.67$, S.D.=0.58) และความเหมาะสมในการใช้เส้นควบคุมจัดลำดับชั้นเพื่อควบคุมอวัยวะตัวละคร ($\bar{x}=4.33$, S.D.=0.58) โดยหัวข้อที่ได้รับการประเมินต่ำที่สุดคือการใช้ inverse kinematics ควบคุมลำตัวตัวละคร ($\bar{x}=4.00$, S.D.=0.00)

3. ผลความพึงพอใจที่มีต่อแอนิเมชัน 3 มิติ เรื่อง The secret weapons ของกลุ่มตัวอย่างจำนวน 28 คน พบว่าความพึงพอใจที่มีต่อแอนิเมชัน 3 มิติ เรื่อง The secret weapons มีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.31 อยู่ในระดับมาก ($\bar{x}=4.31$, S.D.=0.64) โดยผลการประเมินปรากฏดัง (Table 2)

การแปลผลระดับความพึงพอใจแบบมาตราส่วนประมาณค่า นำไปเทียบกับเกณฑ์ขอบเขตของค่าเฉลี่ย ดังนี้ ค่าเฉลี่ย 4.51-5.00 หมายถึงมากที่สุด ค่าเฉลี่ย 3.51-4.50 หมายถึง มาก ค่าเฉลี่ย 2.51-3.50 หมายถึง ปานกลาง ค่าเฉลี่ย 1.51-2.50 หมายถึง น้อย และค่าเฉลี่ย 1.00-1.50 หมายถึง น้อยที่สุด

แบบประเมินผ่านการตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือที่ผ่านการหาค่าสัมประสิทธิ์ความสอดคล้อง (IOC) จากผู้เชี่ยวชาญ 3 คน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.82

Table 2 The satisfaction results of 3D animation named The secret weapons (n=28).

assessment list	$\bar{x}$	S.D.	results
the storyline is consistent with the development and design topic	4.54	0.51	highest
the storyline can be understood and the animation is complete	4.57	0.50	highest
the character sheet is complete and consistent with character information	3.75	0.59	high
the 3D character design is complete	4.50	0.58	highest
the 3D character models are consistent with the design information	3.46	0.58	medium
the design of the scene and the 3D environment are complete	4.29	0.53	highest
the characters can perform Hanuman Tawai Wean gestures of Muay Thai movements	4.57	0.50	highest
the characters can perform Jorakae Fard Hang gestures of Muay Thai movements	4.64	0.49	highest
the movements of the main characters can perform the gestures of Muay Thai	4.54	0.51	highest
every character's movement is natural	4.61	0.50	highest
the movement of the characters is beautiful, charming and unique	4.25	0.52	high
the simulating natural light conditions and image quality	4.32	0.61	high
the image and sound sequencing in animation	4.04	0.69	high
mean	4.31	0.64	high

จาก (Table 2) พบว่าความพึงพอใจที่มีต่อแอนิเมชัน 3 มิติ เรื่อง The secret weapons มีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.31 อยู่ในระดับมาก ($\bar{x}=4.31$, S.D.=0.64) โดยหัวข้อที่ได้รับการประเมินอยู่ในระดับมากที่สุด 3 ลำดับแรก คือ การแสดงท่าแม่ไม้มวยไทยจะเข้าพาดหาง ($\bar{x}=4.64$, S.D.=0.49) การเคลื่อนไหวของตัวละครมีความเป็นธรรมชาติ ($\bar{x}=4.61$, S.D.=0.50) การดำเนินเรื่องมีความสมบูรณ์เข้าใจได้ง่าย และการเคลื่อนไหวท่าแม่ไม้มวยไทยหนุมนถวยแหวน ($\bar{x}=4.57$, S.D.=0.50) โดยหัวข้อที่ได้รับการประเมินในระดับที่ต่ำที่สุดคือระดับปานกลาง คือแบบจำลองตัวละคร 3 มิติ มีลักษณะตรงตามข้อมูลการออกแบบ ($\bar{x}=3.46$, S.D.=0.58)

อภิปรายผล

จากการนำแนวคิดหลักการคำนวณมุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์แบบ inverse kinematics

มาประยุกต์ใช้ควบคุมการเคลื่อนไหวท่าแม่ไม้มวยไทยของตัวละคร ผู้วิจัยทำการศึกษาลักษณะของข้อต่อและการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์ เพื่อทำความเข้าใจในระบบการหมุนของแกนหลายแกนเพื่อให้ปลายทางของแขนกลอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการนำมาประยุกต์ใช้กับการทำงานวางแผนกำหนดตำแหน่งของจุดหมุนข้อต่อบนโมเดลตัวละครตรงตามข้อมูลกายวิภาคมนุษย์งานแอนิเมชัน 3 มิติ ผู้วิจัยพบว่าการใช้รูปแบบการคำนวณมุมการเคลื่อนที่ inverse kinematics สามารถลดเวลาและลดโอกาสการเกิดความผิดพลาดในการหมุนข้อต่อจุดหมุนบนตัวละครได้ เนื่องจากในซอฟต์แวร์ผลิตงานแอนิเมชันจะสนใจที่ปลายทางของการเคลื่อนไหวโดยให้คอมพิวเตอร์คำนวณมุมและองศาการหมุนของแกนหมุนในข้อต่อส่วนต่าง ๆ ระหว่างทาง สอดคล้องกับ Panomruttanarug, Pornsukvittoon, & Pakkawanit (2017) ที่ได้กล่าวว่าการสั่งงานให้หุ่นยนต์แขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง

ใด ๆ นั้น สามารถควบคุมการเคลื่อนของหุ่นยนต์ที่ได้สองวิธี ได้แก่ ควบคุมโดยป้อนตำแหน่งของปลายแขน (end effector) และควบคุมโดยป้อนค่ามุมแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์แขนกล (joint angle) ให้กับหุ่นยนต์โดยตรง การใช้งานแต่ละวิธีขึ้นอยู่กับวิธีการสั่งงานของผู้ใช้งาน โดยทั่วไปถ้าผู้ใช้งานมีการสั่งงานให้หุ่นยนต์แขนกลมีการเคลื่อนที่ไปยังพิกัดที่ต้องการ สามารถพิจารณามุมในแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์ได้จากจลนศาสตร์แบบผกผัน (inverse kinematics) ผู้วิจัยได้ผสมผสานกับการใช้ความรู้ด้านกายวิภาคกำหนดขีดจำกัดในการเคลื่อนไหว ข้อต่อจุดหมุนบนร่างกายมนุษย์ทำให้เกิดความสมจริงขึ้นในงานแอนิเมชัน โดยการควบคุมตัวละครแบบ inverse kinematics นี้จะตรงตามธรรมชาติของการเคลื่อนไหวร่างกายมนุษย์ จึงเกิดความเป็นธรรมชาติมากกว่าแบบ forward kinematics เช่นในการเคลื่อนไหวของมนุษย์นั้นหากเราต้องการหยิบถ้วยกาแฟบนโต๊ะโดยปกติแล้วเราจะเอื้อมมือไปหยิบถ้วยกาแฟได้เลยโดยที่ไม่ได้คำนึงถึงว่าจะต้องหมุนหัวไหล่ ข้อศอก ข้อมือ แบบไหนอย่างไร ทำให้ลดขั้นตอนและเวลาในการทำงานของแอนิเมเตอร์ ผลงานจึงสำเร็จสมบูรณ์ตามเวลา

ผู้วิจัยได้ให้ความสำคัญกับการค้นคว้าและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้ได้ข้อสรุปด้านเนื้อเรื่องและข้อมูลเบื้องหลังตัวละครที่มีบทบาทเป็นนักมวยไทยในโลกอนาคต ให้ผู้ชมได้สามารถเข้าใจถึงภารกิจของตัวละครเอก เกิดความสนุกสนานในการรับชมการดำเนินเรื่อง ร่วมกับการออกแบบโมเดลตัวละครแอนิเมชัน 3 มิติที่อาศัยความรู้และทักษะด้านการออกแบบเชิงศิลปะประยุกต์ร่วมกับความรู้ด้านเทคโนโลยีสร้างแบบจำลองตัวละคร 3 มิติที่มีสัดส่วน

ใกล้เคียงมนุษย์เพื่อให้ง่ายต่อการอ้างอิงข้อมูลกายวิภาคเพื่อให้ง่ายต่อการทำงานใช้ inverse kinematics มีประสิทธิภาพเต็มที่ในการใช้ควบคุมการเคลื่อนไหวของตัวละครในการออกอาวุธแม่ไม้มวยไทยและการเคลื่อนไหวตลอดแอนิเมชัน เพื่อให้การเคลื่อนไหวในส่วนต่าง ๆ บนร่างกาย และข้อต่อจุดหมุนของตัวละครสัมพันธ์กัน จึงจำเป็นต้องเข้าใจหลักการการทำงานและให้ความสำคัญกับการเคลื่อนไหวของตัวละคร ทั้งนี้ การขึ้นรูปทรงที่ดีจะส่งผลถึงขั้นตอนต่าง ๆ ได้แก่ การใส่กระดูก การกำหนดสัดส่วนควบคุมกล้ามเนื้อในส่วนต่าง ๆ ให้กับตัวละคร ประกอบกับการตัดต่อภาพและเสียงเพื่อเพิ่มอรรถรสในการรับชม และเพื่อเน้นย้ำสิ่งที่ผู้พัฒนาต้องการสื่อสารถึงผู้ชมได้อย่างเต็มที่ รวมถึงกลุ่มเป้าหมายที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ทุกคนต่างได้รับหัวข้องานในการทำงานการออกแบบและพัฒนาตัวละครแอนิเมชัน และวางแผนควบคุมตัวละครแอนิเมชันตามเทคนิคที่ตนเองค้นคว้ามา จึงเกิดการแลกเปลี่ยนข้อคิดเห็นในการทำงาน ส่งผลให้ผู้เรียนเกิดองค์ความรู้ใหม่และมีทักษะการคิดเชิงสร้างสรรค์เพิ่มมากขึ้น

สรุป

จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าการที่ผู้วิจัยวางแผนลำดับขั้นตอนการทำงานโดยเริ่มจากการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องมาวิเคราะห์เพื่อรวบรวมเป็นข้อมูลเพื่อการออกแบบตัวละคร จากนั้นนำข้อมูลในการออกแบบตัวละครพัฒนาเป็นแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนไหวตัวละครให้จำลองการเคลื่อนไหวแบบมนุษย์โดยใช้ข้อมูลที่ศึกษามากำหนดตำแหน่งของจุดหมุนข้อพับและใช้ inverse kinematics เป็นตัวช่วย

ในการสร้างจุดควบคุมและสร้างขีดจำกัดในการเคลื่อนไหวก่อนเพื่อให้ตัวละครเคลื่อนไหวก่อนได้อย่างเป็นธรรมชาติ ส่งผลให้ผลการประเมินคุณภาพการออกแบบและพัฒนาแอนิเมชัน 3 มิติ ที่มีการควบคุมการเคลื่อนไหวก่อนท่าแม่ไม้มวยไทยของตัวละครแบบ inverse kinematics แบ่งเป็น รายด้านที่ 1 การประเมินคุณภาพด้านองค์ประกอบภาพเคลื่อนไหวก่อนสำหรับงานแอนิเมชัน 3 มิติ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.38 อยู่ในระดับมาก และรายด้านที่ 2 ประเมินคุณภาพด้านเทคนิคการควบคุมการเคลื่อนไหวก่อนตัวละครแบบ inverse kinematics มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.38 อยู่ในระดับมาก และส่งผลให้ผลความพึงพอใจที่มีต่อแอนิเมชัน 3 มิติ เรื่อง The secret weapons มีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.31 อยู่ในระดับมาก

ผู้วิจัยได้ศึกษาและนำหลักการเคลื่อนที่ของข้อต่อจุดหมุนแขนหุ่นยนต์แบบ inverse kinematics ประยุกต์ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนไหวก่อนตัวละครแอนิเมชันในการทำท่าแม่ไม้มวยไทย โดยที่เปลี่ยนจากการควบคุมตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์อยู่ในตำแหน่งพิกัดที่ต้องการและหาค่าการหมุนของมอเตอร์แต่ละตัวบนแขนกลนั้น เป็นการจำลองหลักการนี้บนร่างกายของตัวละครแอนิเมชัน โดยที่ผู้สร้างแอนิเมชันจะทำการเปลี่ยนตำแหน่งของมือ เท้า และปลายศีรษะของตัวละคร โดยให้ซอฟต์แวร์คำนวณค่าการหมุนของจุดหมุนข้อพับของตัวละคร เช่นจุดหมุนข้อศอก จุดหมุนหัวเข่า จุดหมุนคอให้อัตโนมัติจึงทำให้ลดเวลาการทำงานที่ซับซ้อนในการระบุค่าการหมุนของข้อพับต่าง ๆ นี้ได้ และใช้ inverse kinematics เป็นตัวช่วยในการสร้างจุดควบคุมและสร้างขีดจำกัดในการเคลื่อนไหวก่อนโดยจำกัดองศาการหมุนของข้อพับ

เพื่อให้ตัวละครเคลื่อนไหวก่อนได้อย่างเป็นธรรมชาติ สมจริง แต่อย่างไรก็ตามในการเคลื่อนไหวก่อนของตัวละครที่มีความละเอียดสูงเช่นการเคลื่อนไหวก่อนของนิ้วตัวละคร เส้นผม ใบหน้า หรือการปลิวของผ้า เป็นต้น ยังจำเป็นต้องใช้การควบคุมการเคลื่อนไหวก่อนแบบ forward kinematics ทำงานควบคู่ไปด้วยเนื่องจากสามารถควบคุมการเคลื่อนไหวก่อนของวัตถุที่มีความละเอียดได้ดี เนื่องจากเมื่อนำ forward kinematics มาประยุกต์ใช้กับการควบคุมการเคลื่อนไหวก่อนตัวละครแอนิเมชัน ผู้สร้างแอนิเมชันจะต้องกำหนดการหมุนให้กับข้อต่อจุดหมุนทุกจุดตามลำดับเพื่อให้ตำแหน่งปลายทางอยู่ในพิกัดที่ต้องการ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการเปรียบเทียบวิธีการ inverse kinematics กับ forward kinematics ในกรณีที่หลากหลาย เพื่อให้ได้ข้อสรุปว่าควรเลือกวิธีการควบคุมการเคลื่อนไหวก่อนตัวละครด้วยวิธีการใดให้เหมาะสมกับงาน
2. ควรเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้ร่วมกันระหว่างหลักการ inverse kinematics กับ forward kinematics ในการประยุกต์ใช้ควบคุมการเคลื่อนไหวก่อนตัวละครแอนิเมชัน

เอกสารอ้างอิง

- Panomruttanarug, B., Pomsukvittoon, W., & Pakkawanit, J. (2017). A study of forward and inverse kinematics for 6-link robot arm (Staubli RX 90). *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 27(2), 241-252. (in Thai)
- Panyawan, N. (2019). Character model design and 3D animation creation. *Executive Journal*, 39(1), 67-81. (in Thai)

- Phunsa, S. (2019). The development of augmented reality for creative learning martial art of Thai boxing. *Journal of Innovative Technology Management*, 5(2), 146-154. (in Thai)
- Poodchakarn, S., Thongsa-ard, K., Sae-eaw, C., Lim, J., & Primee, S. (2012). The development of 3-axis robot arm for material handling. *Proceeding of the Industrial Engineering Annual Conference* 2555 (pp. 1248-1253). Phetchaburi: Sripatum University. (in Thai)
- Spong, W. M., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2006). *Robot modeling and control*. New York: John Wiley & Sons.
- Sutapan, A., & Sangveraphunsiri, V. (2017). Upper-limb exoskeleton robot with rehabilitation activities for stroke rehabilitation. *Srinakharinwirot Engineering Journal*, 12(2), 178-188. (in Thai)