

## บทความวิชาการ

# การวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงในกลศาสตร์

พรรัตน์ วัฒนกสิวิช<sup>1,2\*</sup> และ จิราภรณ์ ปุณยวัฒน์พรกุล<sup>1</sup>

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีส่งผลให้กล้องดิจิทัลที่มีฟังก์ชันถ่ายวิดีโออัตราเร็วสูงมีราคาในระดับผู้บริโภค รวมทั้งโปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอหลายโปรแกรมที่พัฒนาโดยนักฟิสิกส์สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองฟิสิกส์โดยเฉพาะในกลศาสตร์ ปัจจัยเหล่านี้สร้างโอกาสให้ผู้สอนวิชาฟิสิกส์สามารถนำเทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงมาใช้สอนในหัวข้อกลศาสตร์ บทความนี้มีเป้าประสงค์เพื่อเผยแพร่ข้อมูลที่จำเป็นต่อการเริ่มต้นบันทึกและวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูง ได้แก่ งานวิจัยที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูง กล้องดิจิทัลอัตราเร็วสูง การจัดองค์ประกอบสำหรับบันทึกวิดีโออัตราเร็วสูง โปรแกรมวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูง การใช้โปรแกรม Tracker เบื้องต้น ตัวอย่างการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงในกลศาสตร์ด้วยโปรแกรม Tracker และความคลาดเคลื่อนในการบันทึกวิดีโอ

**คำสำคัญ:** วิดีโออัตราเร็วสูง โปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอ การทดลองกลศาสตร์

<sup>1</sup>ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

<sup>2</sup>ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ (ThEP) สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา

\*ผู้นิพนธ์ประสานงาน, email: pwattanakasiwich@gmail.com

# High-speed Video Analysis in Mechanics

Pornrat Wattanakasiwich<sup>1,2\*</sup> and Jiraporn Poonyawatpornkul<sup>1</sup>

---

## ABSTRACT

Recently, advances in technologies result in a digital camera with a high-speed video function become available at a consumer level. Moreover video analysis software has been developed by physicists to analysis experimental data in physics, especially in mechanics. These factors create an opportunity for physics instructors to be able to use high-speed video analysis technique in teaching physics. This article aims to provide essential information for recording and analyzing high-speed videos, including research studies using high-speed video analysis, high-speed digital camera, scene setting for recording high-speed video, video analysis programs, introduction to using Tracker program, examples of analyzing high-speed videos with Tracker, and sources of error.

**Keywords:** high-speed video, video analysis software, experiments in mechanics

---

<sup>1</sup>Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University

<sup>2</sup>Thailand Center of Excellence in Physics (ThEP), Commission on Higher Education

\*Corresponding author, email: pwattanakasiwich@gmail.com

## บทนำ

การวิเคราะห์ภาพถ่ายวิดีโอเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ มีการนำไปใช้ในงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์การกีฬา ชีววิทยา และฟิสิกส์ อุปกรณ์หลัก คือ กล้องวิดีโออัตราเร็วสูงซึ่งปกติมีราคาสูง แต่เมื่อประมาณปี ค.ศ. 2008 บริษัท Casio Computer ได้ผลิตกล้องดิจิทัลรุ่น EXILIM Pro EX-F1 และ EX-FH20 ที่มีฟังก์ชันถ่ายวิดีโอที่อัตราเร็วสูงถึง 1,200 และ 1,000 เฟรมต่อวินาที ตามลำดับ เนื่องจากราคาของกล้องอยู่ในระดับผู้บริโภค ผู้สอนฟิสิกส์จึงนำกล้องรุ่นนี้มาเก็บข้อมูลการทดลองฟิสิกส์ในชั้นเรียน ส่วนใหญ่เป็นการทดลองทางกลศาสตร์ [1-19] เพื่อเชื่อมโยงฟิสิกส์ที่เรียนในห้องกับปรากฏการณ์ฟิสิกส์ในโลกจริง [1-3] นอกจากนี้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงส่งเสริมให้ผู้เรียนได้ทำการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลจริงโดยไม่ต้องใช้เครื่องมือในการวัดที่ซับซ้อนและมีราคาสูง เช่น ตัวรับรู้การเคลื่อนที่ (motion sensor) ตัวรับรู้แรง (force sensor) เป็นต้น

เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงเป็นที่แพร่หลายในการเรียนการสอนฟิสิกส์มากขึ้นเป็นผลมาจากสองปัจจัย ปัจจัยแรก คือ กล้องดิจิทัลที่มีฟังก์ชันบันทึกวิดีโออัตราเร็วสูงปรับราคาลงมาในระดับผู้บริโภค [1, 2] เพราะเทคโนโลยีตัวรับสำหรับรับภาพในกล้องดิจิทัลมีประสิทธิภาพสูงขึ้นแต่ต้นทุนลดลง ปัจจัยที่สองคือ โปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอที่พัฒนาโดยนักฟิสิกส์สำหรับวิเคราะห์วิดีโอทางฟิสิกส์โดยเฉพาะ โปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอถือเป็นเทคโนโลยีลูกผสมระหว่างการใช้คอมพิวเตอร์เก็บข้อมูลและโปรแกรมสร้างแบบจำลองที่มีฟังก์ชันในการทำเครื่องหมายแสดงจุดตำแหน่งของวัตถุในแต่ละเฟรมของวิดีโอ ซึ่งได้มาจากการบันทึกด้วยกล้องวิดีโออัตราเร็วสูง จากนั้นผู้ใช้สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุโดยให้โปรแกรมแสดงผลในลักษณะตาราง กราฟ หรือสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเคลื่อนที่ต่างๆ เช่น ตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่ง และเวลา เป็นต้น ในบางโปรแกรม (เช่น Coach 6 และ Tracker 4) ผู้ใช้สามารถสร้างแบบจำลองจากทฤษฎี แล้วนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้ออกจากการทดลอง และหลายโปรแกรม (เช่น VideoPoint, Logger Pro 3, Coach 6 และ Tracker 4) มีฟังก์ชันการคำนวณหาปริมาณการเคลื่อนที่อื่นๆ เพิ่มเติม เช่น พลังงานศักย์ โมเมนตัม และอัตราเร็วเชิงมุม เป็นต้น เมื่อเทียบกับตัวรับรู้ต่างๆ เช่น นาฬิกาจับเวลา โฟโตเกต หรือตัวรับรู้การเคลื่อนที่ เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงมีข้อได้เปรียบในการเก็บข้อมูลเชิงกลศาสตร์ถึง 5 ประการดังนี้ [20]

- 1) วิเคราะห์การเคลื่อนที่ทั้ง 2 มิติได้ในเวลาเดียวกัน เช่น การเคลื่อนเชิงมุม และการเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์
- 2) เก็บข้อมูลของตำแหน่งวัตถุได้ในระยะไกลกว่าการใช้ตัวรับรู้ แต่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับขนาดของวัตถุที่เล็กลง ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ตำแหน่ง
- 3) วิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนที่ของวัตถุหลายชิ้นได้ในเวลาเดียวกัน
- 4) เก็บข้อมูลได้โดยไม่ต้องมีสายต่อหรือตัวประมวลผล
- 5) โปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอสามารถแสดงผลได้หลายแบบพร้อมกัน ได้แก่ ตาราง กราฟ และตำแหน่งของวัตถุ

จากข้อได้เปรียบของเทคนิคการวิเคราะห์วีดิโออัตราเร็วสูงที่กล่าวในข้างต้น ผู้สอนฟิสิกส์ในหลายประเทศจึงนิยมใช้เทคนิคนี้ในการเรียนการสอนฟิสิกส์ แต่ในประเทศไทยยังไม่เป็นที่แพร่หลาย บทความนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับการใช้กล้องวีดิโออัตราเร็วสูงและโปรแกรมวิเคราะห์วีดิโอ มุ่งหวังให้ผู้อ่านสามารถนำความรู้เกี่ยวกับเทคนิคนี้ไปวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองทางกลศาสตร์ได้ในบทความ จะครอบคลุมเนื้อหาเกี่ยวกับงานวิจัยที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์วีดิโออัตราเร็วสูง กล้องดิจิทัลอัตราเร็วสูง การจัดองค์ประกอบสำหรับบันทึกวีดิโออัตราเร็วสูง โปรแกรมวิเคราะห์วีดิโออัตราเร็วสูง การใช้โปรแกรม Tracker เบื้องต้น ตัวอย่างการวิเคราะห์วีดิโออัตราเร็วสูงในกลศาสตร์ด้วยโปรแกรม Tracker และความคลาดเคลื่อนในการบันทึกวีดิโอ

## งานวิจัยที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์วีดิโออัตราเร็วสูง

หลายงานวิจัยวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วีดิโออัตราเร็วสูง ได้แก่ งานวิจัยทางด้านกลศาสตร์ รวมถึงฟิสิกส์ของกีฬา หัวข้อฟิสิกส์อื่นๆ (เช่น เทอร์โมไดนามิกส์ แสง และเสียง) ชีววิทยาที่ศึกษาการเคลื่อนที่ของสิ่งมีชีวิต มีรายละเอียดดังนี้

### กลศาสตร์

งานวิจัยหลายฉบับที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์วีดิโออัตราเร็วสูงเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้แรงต้าน [2-5] เช่น Heck และ Uylings [2] ศึกษาแรงต้านอากาศในการตกของลูกขนไก่ด้วยกล้อง Casio รุ่น EXILIM Pro EX-F1 บันทึกวีดิโอที่อัตรา 300 เฟรมต่อวินาที ค่าอัตราเร็วขณะหนึ่งของลูกขนไก่ขณะที่ตกหาได้จากกราฟวิเคราะห์วีดิโอ และนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของแรงต้านอากาศ (air drag coefficient) พบว่าสอดคล้องกับค่าจากงานวิจัยที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคอื่น Brown และ Cox [3] สอนนักศึกษาใช้เทคนิควิเคราะห์วีดิโออัตราเร็วสูงและสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Tracker เป็นโปรแกรมวิเคราะห์วีดิโอและสร้างแบบจำลองที่ความหนืดโดยไม่มีค่าใช้จ่าย หนึ่งในวีดิโอที่ใช้ศึกษา คือ การตกของถ้วยเค้กกระดาษที่เพิ่มมวลด้วยคลิปหนีบกระดาษ ความเร็วของถ้วยกระดาษที่ตกภายใต้แรงต้านอากาศมีค่าเข้าสู่ความเร็วสุดท้าย (terminal velocity) นักศึกษาพบว่าแบบจำลองการตกของถ้วยกระดาษที่มีแรงต้านอากาศสอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลอง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chanpichai และ Wattanakasiwich [4] ที่ศึกษาวีดิโออัตราเร็วสูงของการเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์ของลูกบาศก์ด้วยอัตรา 300 เฟรมต่อวินาที และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Tracker พบว่าการเพิ่มแรงต้านอากาศในสมการของแรงที่กระทำต่อลูกบาศก์ทำให้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของลูกบาศก์ใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่จริง นอกจากนี้มีงานวิจัยเกี่ยวกับแรงต้านในของเหลว Kaewsutthi และ Wattanakasiwich [5] ศึกษาการเคลื่อนที่ของลูกเหล็กทรงกลมห้อยจากสปริงในอากาศและในน้ำ โดยบันทึกวีดิโอที่อัตรา 300 เฟรมต่อวินาทีและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Tracker พบว่าลูกเหล็กมีการสั่นแบบหน่วงในน้ำ และนำข้อมูลที่วิเคราะห์จากโปรแกรมมาคำนวณค่าความหนืดของน้ำ โดยงานวิจัยนี้ถูกพัฒนาเป็นปฏิบัติการฟิสิกส์

ในหัวข้อแรงเสียดทาน Sato [6] ศึกษาการลดแรงเสียดทานในการเคลื่อนที่ของงานแก้วเพาะเชื้อที่เคลื่อนไปบนลูกบิดขนาดเล็ก (583 mm × 478 mm และหนา 5 mm) ด้วยเทคนิควิเคราะห์วีดิโออัตราเร็วสูง และนำผลไปเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนที่ของงานบนโต๊ะที่มีการพ่นอากาศเพื่อลดแรงเสียดทาน

พบว่ามีความเร็วเฉลี่ยตามกระทำได้กับงานแก้วที่เคลื่อนบนลูกบิดแรงแต่มีค่าน้อยมาก งานวิจัยนี้ถูกพัฒนาเป็นชุดสาริทธิการเคลื่อนที่บนพื้นลื่น เน้นการวิเคราะห์ตำแหน่งและเวลาของงานเพาะเชื้อที่เคลื่อนที่บนลูกบิด เมื่อคำนวณค่าพลังงานจลน์ ณ เวลาต่างๆ มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 3% ถือว่าการเคลื่อนที่อยู่ภายใต้กฎการอนุรักษ์พลังงานกล [7]

Brown และ Cox [3] ใช้โปรแกรม Tracker วิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงแสดงการชนสองมิติในกรอบอ้างอิงจุดศูนย์กลางมวลของลูกฟุตบอล (คล้ายกับลูกยางในกีฬาฮอกกี้ มีลมพ่นจากด้านล่างเพื่อลดแรงเสียดทาน) พบว่า ลูกฟุตบอลสองลูกชนกันแบบไม่ยืดหยุ่นเพราะหลังชนลูกฟุตบอลเกิดการหมุนรอบจุดศูนย์กลางมวล ทำให้สูญเสียพลังงานจลน์ Labous และคณะ [8] ใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงศึกษาสมบัติการชนกันของทรงกลมแบบยืดหยุ่นและแบบไม่ยืดหยุ่นสมบูรณ์ พบว่า อัตราส่วนระหว่างผลต่างของความเร็วก่อนชนต่อผลต่างของความเร็วก่อนชน ที่เรียกว่าค่า COR (Coefficient of Restitution) ขึ้นอยู่กับขนาดและความเร็วเริ่มต้น

งานวิจัยหลายฉบับได้ทำการเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่เชิงมุมด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูง เช่น งานของ Heck และ Vonk [9] ศึกษาการเคลื่อนที่ของเหรียญหกอันที่วางเรียงอยู่ด้านหน้าของแท่งไม้ด้วยระยะห่างเท่ากัน เมื่อลากแท่งไม้ให้ปลายด้านหนึ่งอยู่กับที่และปลายอีกด้านหนึ่งหมุนไปแล้วหยุดแท่งไม้ทันที เหรียญทั้งหกอันยังคงเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ผลการวิเคราะห์พบว่า ความเร็วของเหรียญขึ้นอยู่กับระยะห่างจากจุดหมุน คณะผู้วิจัยนำวิดีโอไปพัฒนาเป็นสื่อการสอนการเคลื่อนที่เชิงมุม นอกจากนี้ Eadkhong และคณะ [10] คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของงานพลาสติกทรงกระบอกที่หมุนรอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลไปตามความหนาของงาน จากเทคนิคการวิเคราะห์วิดีโอความเร็วสูงพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองใกล้เคียงกับค่าจากทฤษฎีในหัวข้อการกลิ้ง Phommarach และคณะ [11] บันทึกวิดีโอการกลิ้งลงพื้นเอียงของทรงกระบอกตันและกลวงและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Tracker พบว่า ถ้าพื้นเอียงด้วยมุมน้อยกว่ามุมวิกฤต (คำนวณด้วยหลักการทอร์ก) ทรงกระบอกตันและกลวงมีการกลิ้งแบบไม่ไถลตามกฎการอนุรักษ์พลังงานกล สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bryan [12] และงานวิจัยของ Asavapibhop และ Suwonjandee [13] ศึกษาการกลิ้งของลูกเหล็กทรงกลมบนรางอะลูมิเนียมที่เอียงทำมุมกับพื้นแล้วขดเป็นวงกลม (loop) ที่ปลายรางขนานไปกับพื้นโต๊ะ ทำให้ลูกเหล็กที่หลุดจากรางมีความเร็วในแนวระดับและเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์ไปตกกระทบพื้น คณะผู้วิจัยใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงเพื่อเปรียบเทียบตำแหน่งที่ลูกเหล็กตกกระทบพื้นกับค่าจากการคำนวณตามหลักการฟิสิกส์ เทคนิคนี้นำไปศึกษาหัวข้อกลศาสตร์อื่นๆ เช่น การตกอย่างอิสระ [12, 14] การแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย [14] และการตกของแท่งไม้ [15] และประยุกต์ใช้กับการกีฬา

Cross [16, 17] ใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงศึกษาฟิสิกส์ของกีฬาหลายประเภท เช่น การกระดอนจากไม้ของลูกเทนนิส เมื่อลูกมีการหมุนควงก่อนกระทบกับไม้แบบประสานงา (head-on) พบว่า ลูกเทนนิสไม่กระดอนกลับไปทิศทางเดิมก่อนตกกระทบไม้ [16] และ Cross [17] ได้ศึกษาเทคนิคการโยนข้ามแขน (overarm throwing) ที่นิยมใช้ในกีฬาเบสบอล นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับฟิสิกส์ของการปั่นจักรยาน [18] และฟิสิกส์ของการกระโดดบันจี้ [19] ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูง

## หัวข้ออื่นทางฟิสิกส์

นอกจากกลศาสตร์เบื้องต้นและการประยุกต์ใช้ในฟิสิกส์ของกีฬาก็มีการนำเทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงไปใช้กับการทดลองเทอร์โมไดนามิกส์ เช่น การวัดการขยายตัวของแผ่นอะลูมิเนียมสองแผ่นที่มีระยะห่างเป็นช่องว่างขนาดเล็กมาก เมื่อส่งเลเซอร์ผ่านช่องว่างเกิดเป็นริ้วการเลี้ยวเบนบนฉาก โดยแผ่นอะลูมิเนียมบางส่วนจุ่มในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำ เมื่อให้ความร้อนแก่น้ำจนอุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น แผ่นอะลูมิเนียมเกิดการขยายตัวทำให้ช่องว่างแคบลง บันทึกวิดีโอของริ้วการเลี้ยวเบนที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของน้ำเพื่อวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอะลูมิเนียม [3] สำหรับการเกิดสเปกตรัมวิดีโออัตราเร็วสูงที่บันทึกการเกิดสเปกตรัมในห้องทดลองสามารถใช้โปรแกรม Tracker วิเคราะห์สมบัติของเส้นสเปกตรัม เช่น ความยาวคลื่น ความสว่างสัมพัทธ์ และความกว้างของแถบสเปกตรัม [3] นอกจากนี้มีการใช้เทคนิควิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงในการหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศ [21]

## ชีววิทยา

นักชีววิทยานำเทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงไปศึกษาการเคลื่อนที่ของสิ่งมีชีวิต เช่น งานวิจัยของ Tien และคณะ [22] บันทึกวิดีโออัตราเร็วสูงเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระดับการกระพือปีกของแมลงตัวที่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้า งานวิจัยนี้เป็นพื้นฐานสำหรับเข้าใจพฤติกรรมและการควบคุมตัวเองของแมลงที่บินได้ มีการตรวจสอบผลกระทบของพัลส์ไฟฟ้าต่อระบบประสาทและกลไกการกระตุ้นเส้นประสาทเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับการบินของแมลงตัว Lauder และคณะ [23] บันทึกวิดีโอที่อัตรา 250 เฟรมต่อวินาที เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของครีบอกในปลาชนิด bluegill sunfish จึงต้องฉีดสีที่ครีบอกของปลาเพื่อให้สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่และการโต้ตอบของครีบได้ชัดเจนขึ้น

## กล้องดิจิทัลอัตราเร็วสูง

กล้องที่มีฟังก์ชันบันทึกวิดีโออัตราเร็วสูงสามารถแบ่งประเภทตามคุณภาพของวิดีโอ ข้อกำหนดคุณลักษณะและราคาออกเป็น 4 ระดับ (ตัวอย่างของกล้องบางรุ่นแสดงในรูปที่ 1) [24] คือ

- ระดับสูงมาก เช่น กล้อง Shimadzu HPV2
- ระดับสูง เช่น Vision Research Phantom series
- ระดับกลาง เช่น NAC Hotshot และ
- ระดับผู้บริโภค เช่น Casio Exilim F Series และ Samsung WB2000



(ก)



(ข)



(ค)

### รูปที่ 1 กล้องวิดีโออัตราเร็วสูง

(ก) กล้อง Shimadzu HPV2 [25]

(ข) กล้อง NAC Hotshot [25] และ

(ค) กล้อง Casio Exilim F1 [26]

ในปัจจุบันกล้องดิจิทัลที่มีฟังก์ชันบันทึกวิดีโออัตราเร็วสูงใช้เทคโนโลยีตัวรับรู้อำนาจรับภาพแบ่งเป็นสองประเภท [24] คือ charge-coupled devices (CCD) หรือ complementary-metal-oxide-semiconductor (CMOS) เทคโนโลยีตัวรับรู้อำนาจรับภาพแบบ CMOS มีราคาต่ำกว่าและมีประสิทธิภาพสูงกว่า ดังนั้นบริษัทผู้ผลิตจึงนิยมใช้และพัฒนาเทคโนโลยี CMOS สำหรับกล้องดิจิทัลระดับผู้บริโภคอย่างต่อเนื่อง ส่วนตัวรับรู้อำนาจรับภาพแบบ CCD มีข้อดี คือ สัญญาณรบกวนต่ำและจับภาพที่มีความละเอียดสูง แต่กระบวนการประมวลผลของตัวรับรู้อำนาจรับภาพแบบ CCD ช้ากว่าตัวรับรู้อำนาจรับภาพแบบ CMOS จึงเป็นข้อจำกัดในการใช้บันทึกวิดีโออัตราเร็วสูง ดังนั้นกล้องดิจิทัลที่มีฟังก์ชันถ่ายวิดีโออัตราเร็วสูงในระดับล่างและระดับกลางจึงนิยมใช้ตัวรับรู้อำนาจรับภาพแบบ CMOS ส่วนกล้องระดับสูงขึ้นไปใช้ตัวรับรู้อำนาจรับภาพแบบพิเศษร่วมกับการใช้กระจกหมุน เช่น กล้อง Shimadzu's HPV2 ใช้ไมโครชิปแบบ IS-CCD ทำให้บันทึกวิดีโอได้ที่อัตราเร็ว 1,000,000 เฟรมต่อวินาที และมีความละเอียด 312 พิกเซล  $\times$  260 พิกเซล นอกจากนี้เทคโนโลยีตัวรับรู้อำนาจรับภาพที่สำคัญที่ควรรู้เกี่ยวกับกล้องอัตราเร็วสูงมีดังนี้

### อัตราส่วนของภาพต่อเวลาและเวลาประมวลผล

อัตราส่วนของภาพต่อเวลา (frame rate) คือ จำนวนภาพที่ถ่ายได้ในหนึ่งหน่วยเวลา และเวลาประมวลผล (integration time) คือ เวลาที่ใช้ในการสร้างกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นตัวสร้างสัญญาณภาพในกล้องวิดีโอระดับล่างเวลาประมวลผล คือ ส่วนกลับของอัตราส่วนภาพต่อเวลา เช่น อัตราส่วนภาพต่อเวลาเป็น 25 ภาพต่อวินาที มีเวลาประมวลผล คือ 1/25 วินาที หรือ 40 มิลลิวินาที กล้องรุ่น EXILIM F series สามารถลดเวลาประมวลผลด้วยการลดความสว่างของภาพ ส่วนกล้องที่มีคุณภาพสูงสามารถปรับค่าอัตราส่วนของภาพต่อเวลาและเวลาประมวลผลได้ในช่วงที่กว้างและครอบคลุมมากขึ้น เช่น กล้อง NAC Hotshot 512 บันทึกวิดีโอที่ 4,000 ภาพต่อวินาที และสามารถปรับค่าเวลาประมวลผลได้ตั้งแต่ 1/4,000 วินาที ไปจนถึง 1/200,000 วินาที เมื่อกำหนดใช้อัตราส่วนของภาพต่อเวลาที่มีค่าเดียวกัน ภาพที่ถ่ายด้วยเวลาประมวลผลที่สั้นจะสวยและคมชัดกว่า ส่วนภาพที่ถ่ายด้วยเวลาประมวลผลที่สูงกว่าจะไม่คมชัดเท่า การลดเวลาประมวลผลทำได้สองวิธี คือ (1) ปรับเปลี่ยนความสว่างของไฟส่องสว่าง และ (2) เพิ่มอัตราส่วนของภาพต่อเวลาให้สูงขึ้นขณะเปิดชัตเตอร์ [24]

ในตารางที่ 1 ได้สรุปและเปรียบเทียบกล้องดิจิทัลระดับผู้บริโภคที่มีฟังก์ชันวิดีโออัตราเร็วสูงสำหรับกล้อง Casio ยกตัวอย่างมาเฉพาะบางรุ่น

ตารางที่ 1 กล้องดิจิทัลที่มีฟังก์ชันบันทึกวิดีโออัตราเร็วสูง

กล้อง	อัตราเร็วของวิดีโอ (ความละเอียดของภาพ)	ความละเอียดของ กล้องทั่วไป	ราคา (โดยประมาณ)
Casio EX-F1	ปรับอัตราเร็วได้ 300 fps (512×384), 600 fps (432×192), 1200 fps (336×96) [26]	6.0 ล้านพิกเซล	 35,000 บาท
Casio EX-FH100	ปรับอัตราเร็วได้ 30-120 fps (640×480), 240 fps (448×336), 420 fps (224×168), 1000 fps (224×64) [26]	10.1 ล้านพิกเซล	 10,000 บาท
Casio EX-ZR200	ปรับอัตราเร็วได้ 30-240 fps (512×384), 240 fps (512×384), 480 fps (224×160), 1000 fps (224×64) [26]	16.1 ล้านพิกเซล	 10,000 บาท
Casio EX-FC100	ปรับอัตราเร็วได้ 30-210 fps (512×384), 210 fps (512×384), 420 fps (224×168), 1000 fps (224×64) [26]	9.1 ล้านพิกเซล	 8,000 บาท
Canon IXUS 500HS	ปรับอัตราเร็วได้ 120 fps (640×480), 240 fps (320×240) [27]	10.1 ล้านพิกเซล	 18,500 บาท
Samsung WB2000	ปรับอัตราเร็วได้ 30 fps (640×480), 240 fps (432×320), 420 fps (224×160), 1000 fps (192×64) [28]	10.2 ล้านพิกเซล	 12,990 บาท
Nikon 1	ปรับอัตราเร็วได้ 400 fps (640×240) และ 1200 fps (320×120) [29]	10.1 ล้านพิกเซล	 21,999 บาท



### ขนาดหน่วยความจำ เวลาในการบันทึก และจำนวนพิกเซล

เมื่อไม่มีการบีบอัดไฟล์ภาพหรือวิดีโอขนาดของหน่วยความจำ (MEM, memory size) ในหน่วยไบต์ คำนวณจากสมการ [24]

$$MEM = N_{pix} \times col \times FR \times t_{Rec} \quad (1)$$

เมื่อ  $N_{pix}$  คือ จำนวนพิกเซลของตัวรับรู้ (หน่วย พิกเซล)

$col$  คือ ความสามารถในการแยกแยะเฉดสี (color depth) (หน่วย ไบต์/พิกเซล)

$FR$  คือ อัตราส่วนภาพต่อวินาที (หน่วย เฟรมต่อวินาที)

$t_{Rec}$  คือ เวลาในการบันทึกภาพ (หน่วย วินาที)

กล้องระดับกลางและสูงจัดเก็บไฟล์แบบข้อมูลดิบ ไฟล์ถูกบีบอัดน้อยมากขนาดของหน่วยความจำเป็นไปตามสมการที่ (1) ส่วนกล้องระดับผู้บริโภค (เช่น Casio) ใช้ขั้นตอนบีบอัดข้อมูลค่าที่ได้จึงแตกต่างจากสมการที่ (1) ตัวอย่างเช่น กล้อง Casio Ex-F1 หน่วยความจำภาพ 32 MB บันทึกภาพขนาด 336 พิกเซล  $\times$  96 พิกเซล ใช้เวลาในการบันทึกภาพ 14 วินาที ที่อัตรา 1,200 เฟรมต่อวินาที มีค่าความสามารถในการแยกแยะเฉดสีเพียง 0.5 บิต/พิกเซล เมื่อเปรียบเทียบกับภาพจากวิดีโออัตราเร็วสูงที่มีจัดเก็บไฟล์แบบดิบ ภาพมีความสวยงามและคมชัดมากกว่า เพราะค่าความสามารถในการแยกแยะเฉดสีประมาณ 8 บิต/พิกเซล กล้อง Casio Exilim มีค่าต่ำกว่า เพราะบันทึกไฟล์แบบบีบอัด [24] แต่ข้อดีคือ ไฟล์วิดีโอบันทึกจากกล้อง Casio มีขนาดเล็กกว่าไฟล์จากกล้องระดับกลางและระดับสูง

### อัตราการส่งผ่านข้อมูล

นอกจากขนาดของหน่วยความจำแล้ว ปริมาณสำคัญสำหรับกล้องอัตราเร็วสูงระดับกลางขึ้นไปคือ อัตราการส่งผ่านข้อมูลจากตัวรับรู้ไปยังไมโครชิปหน่วยความจำกล้อง Casio Ex-F1 ใช้เวลา 14 วินาทีในการบันทึกไฟล์วิดีโอขนาด 32 MB เท่ากับหน่วยความจำภายในเครื่อง โดยมีอัตราการส่งผ่านข้อมูล 2.28 MB ต่อวินาที กรณีใช้การ์ด SD แบบ SDHC ขนาด 1 GB (ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้การ์ด class 10 ขึ้นไป) สามารถบันทึกวิดีโออัตราเร็วสูงได้มากกว่า 5 นาที ในภาพรวมกล้อง Casio รุ่น EXILIM เป็นกล้องดิจิทัลระดับผู้บริโภคที่มีฟังก์ชันบันทึกวิดีโออัตราเร็วสูงที่มีประสิทธิภาพและคุณภาพดีที่สุดในเมื่อเทียบกับราคา จึงเหมาะสำหรับบันทึกวิดีโออัตราเร็วสูงเพื่อการเรียนการสอนฟิสิกส์

### การจัดองค์ประกอบสำหรับบันทึกวิดีโออัตราเร็วสูง

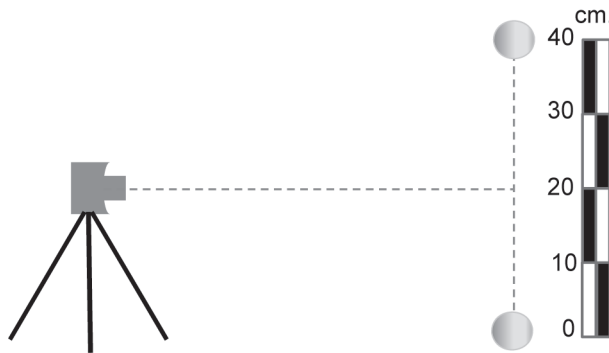
#### ความเข้มแสงและการส่องสว่าง

สำหรับการบันทึกวิดีโออัตราเร็วสูง การจัดแสงต้องมีความเข้มแสงมากกว่าปกติ เพราะความเข้มแสงจะลดลง เมื่อปรากฏในภาพวิดีโอ การส่องสว่างสำหรับบันทึกวิดีโออัตราเร็วสูงควรใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงต่อเนื่อง เช่น แสงธรรมชาติภายนอกอาคาร แสงจากหลอดไส้ หลอดไดโอดเปล่งแสง หรือหลอดแบบปล่อยประจุไฟฟ้า กล้องวิดีโอทั่วไปไม่สามารถบันทึกภาพได้ในสภาพแสงน้อยกว่า 5 ลักซ์ (lux) เพราะภาพจะขาดความคมชัด วิดีโอที่มีความคมชัดในระดับดีต้องบันทึกภาพในสภาพแสงมากกว่า

1000 ลักซ์ เช่น การบันทึกวิดีโอภายนอกอาคารในช่วงเวลากลางวัน หรือภายในอาคารที่มีแสงแดดส่องถึง ถ้าสภาพแสงไม่เพียงพอสามารถใช้อุปกรณ์ช่วยเพิ่มแสงสว่างให้กับวัตถุ (ดังที่กล่าวข้างต้น) เพื่อให้วิดีโอมีความคมชัดเพิ่มขึ้น

### การติดตั้งกล้อง

การบันทึกวิดีโอการเคลื่อนที่ของวัตถุต้องคำนึงถึงความคลาดเคลื่อนที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ ซึ่งอาจทำให้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลมีความคลาดเคลื่อนสูงหรือได้ข้อมูลที่ขาดความน่าเชื่อถือ ความคลาดเคลื่อนส่วนมากมีสาเหตุจากมุมกล้อง รวมทั้งการบิดเบี้ยวของเลนส์กล้อง ทั้งนี้ต้องตั้งกล้องให้ระนาบของหน้ากล้องขนานกับระนาบการเคลื่อนที่ในสองมิติของวัตถุ และหน้ากล้องควรอยู่ตรงกึ่งกลางของระนาบการเคลื่อนที่ (ดังรูปที่ 2)



รูปที่ 2 การตั้งกล้องเทียบกับระนาบการเคลื่อนที่

นอกจากนี้ควรติดตั้งแถบมาตรฐานที่บอกระยะ (scale bar) ใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ต้องการบันทึกวิดีโอ โดยวางให้อยู่บนระนาบเดียวกับการเคลื่อนที่ โดยแถบนี้ต้องปรากฏในวิดีโอเพื่อตั้งค่าความยาวอ้างอิงในโปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอ

### การจัดฉาก

ฉากด้านหลังของวัตถุที่ต้องการบันทึกวิดีโอควรมีสีเข้มและเป็นสีโทนเดียวที่ไม่รบกวนสายตา หรือฉากเป็นสีที่ตรงข้ามกับสีของวัตถุ สำหรับวัตถุอาจมีการติดสติ๊กเกอร์สะท้อนแสงหรือทำเครื่องหมายที่วัตถุเพื่อให้วัตถุมีความโดดเด่นและง่ายต่อการระบุตำแหน่งในโปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอ

### โปรแกรมวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูง


ในปัจจุบันมีโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์วิดีโอหลายโปรแกรม ในที่นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของโปรแกรมที่นิยมใช้วิเคราะห์วิดีโอการทดลองฟิสิกส์และโปรแกรมเสริมที่ต้องใช้รวมถึงราคาเป็นดอลลาร์สหรัฐ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการเปรียบเทียบ บางโปรแกรมที่ต้องซื้อลิขสิทธิ์สามารถทดลองใช้ภายในเวลา 30 วัน โดยสามารถดาวน์โหลดที่เว็บไซต์ในตารางที่ 2

## ตารางที่ 2 โปรแกรมวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงที่นิยมใช้ในการทดลองฟิสิกส์

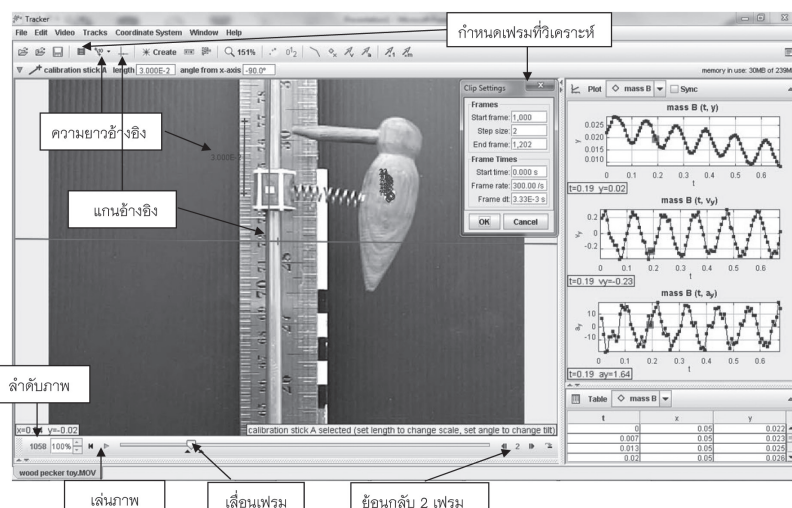
โปรแกรม	รายละเอียด	โปรแกรมเสริม	ราคา
VideoPoint	พัฒนาเพื่อการเรียนการสอนฟิสิกส์โดยเฉพาะ ใช้งานง่าย และมีฟังก์ชันสำหรับการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ที่ครบถ้วน [30]	DirectX® 9 QuickTime 7 ที่ว่างในฮาร์ดดิสก์ 250 MB	\$149 USD
Logger Pro 3	เป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยบริษัท Vernier ที่ผลิตเครื่องวัดและตัวรับรู้อุปกรณ์การทดลองวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะฟิสิกส์ทำให้สามารถเปรียบเทียบข้อมูลจากวิดีโอกับการทดลอง [31]	500 MHz 512 MB RAM ที่ว่างในฮาร์ดดิสก์ 200 MB	\$258 USD
Coach 6 Studio MV	พัฒนาในประเทศเนเธอร์แลนด์ คล้ายกับโปรแกรม Logger Pro คือสามารถใช้ร่วมกับเครื่องวัดของ CMA สามารถวิเคราะห์วิดีโอและสร้างแบบจำลองได้ มีฟังก์ชันในการแก้ไขความคลาดเคลื่อนจากเลนส์ [32]	QuickTime 7 ที่ว่างในฮาร์ดดิสก์ 250 MB	\$395 USD
Measurement in Motion	พัฒนาสำหรับใช้กับระบบ Macintosh แต่ต่อมาได้มีการปรับให้ใช้ได้กับระบบ Windows ผู้ใช้สามารถโปรแกรมความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้ ทำให้ตอบสนองการวิเคราะห์ที่หลากหลายได้เหมาะสำหรับนักศึกษาที่มีความรู้ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา [33]	QuickTime 7 ที่ว่างในฮาร์ดดิสก์ 250 MB	\$129 USD
Physics Toolkit 6.0	พัฒนาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์วิดีโอเกี่ยวกับกลศาสตร์ เสี่ยงและคลื่น โดยมีตัวอย่างคลิปวิดีโอ แต่ไม่สามารถหมุนแกนอ้างอิงได้ [34]	เล่นได้เฉพาะใน PC โปรแกรมที่เล่นวิดีโอ AVI ได้ ที่ว่างในฮาร์ดดิสก์ 630 MB	\$0 USD
DataPoint	พัฒนาเพื่อใช้วิเคราะห์ปรากฏการณ์เชิงกลศาสตร์ มีฟังก์ชันพื้นฐานในการตามรอยการเคลื่อนที่ ต้องนำข้อมูลตำแหน่งของวัตถุไปวิเคราะห์ต่อในซอฟต์แวร์ตารางทำงาน (Spreadsheet software) [35]	โปรแกรมที่เล่นวิดีโอ AVI หรือ MPEG ได้ ที่ว่างในฮาร์ดดิสก์ 100 MB	\$0 USD
Tracker 4	พัฒนาโดยนักฟิสิกส์เพื่อใช้วิเคราะห์วิดีโอและสร้างแบบจำลองในทางฟิสิกส์โดยเฉพาะ จึงมีฟังก์ชันการใช้งานที่สะดวกและง่ายต่อการวิเคราะห์ [36]	Java 1.5 (32 bits) QuickTime 7 ที่ว่างในฮาร์ดดิสก์ 250 MB	\$0 USD

## การใช้โปรแกรม Tracker เบื้องต้น



โปรแกรม Tracker ใช้สำหรับวิเคราะห์วิดีโอและสร้างแบบจำลองหรือสมการที่สนใจศึกษา [36] พัฒนาโดยนักฟิสิกส์ สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุ คำนวณหาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง และวาดกราฟการเคลื่อนที่ เช่น กราฟตำแหน่งกับเวลา ความเร็วกับเวลา และความเร่งกับเวลา หรือผู้ใช้สามารถให้โปรแกรมแสดงกราฟระหว่างตัวแปรสองตัวใดๆ ที่ต้องการได้ ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมเบื้องต้นมีดังนี้


**ขั้นที่ 1 เปิดโปรแกรม** เลือกเปิดที่ไอคอน  หรือในการเรียกใช้โปรแกรมครั้งต่อไปเลือกคลิกขวาที่ไอคอนดังกล่าวเพื่อสร้างทางลัดไว้บนหน้าจอ จะปรากฏหน้าต่างของโปรแกรม Tracker จากนั้นเปิดไฟล์วิดีโอที่ต้องการวิเคราะห์ โดยเลือกที่ File > Import > เลือกไฟล์ที่ต้องการ > Open จะปรากฏหน้าต่างของโปรแกรมและมีไฟล์วิดีโอที่ต้องการวิเคราะห์ ในรูปที่ 3 แสดงตัวอย่างการใช้ Tracker วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของของเล่นที่เรียกว่า Woodpecker หรือนกหัวขวาน

**ขั้นที่ 2 กำหนดเฟรม** ขั้นตอนนี้เป็นการกำหนดเวลาในโปรแกรม Tracker เมื่อเปิดไฟล์โปรแกรมจะเริ่มวิดีโอที่เฟรม 000 เสมอ สามารถเลือกเฟรมเพื่อวิเคราะห์โดยเลือกปุ่มกำหนดคลิป (Clip settings) จะปรากฏหน้าต่างบนหน้าต่างหลักของโปรแกรมดังรูปที่ 3 จากนั้นสามารถกำหนด Start frame และ End frame คือ เฟรมเริ่มต้นและเฟรมสุดท้ายที่ใช้สำหรับกรวิเคราะห์ ในรูปที่ 3 กำหนดให้ Start frame คือ 1000 และ End frame คือ 1202 มีค่า Step size คือการเลื่อนลำดับเฟรมที่จะวิเคราะห์ถัดไป ในรูปที่ 3 Step size คือ 2 หรือเลื่อนลำดับที่ละสองเฟรม ดังนั้นลำดับเฟรมที่วิเคราะห์ คือ 1000, 1002, ... 1202 ตามลำดับ ส่วน Start time คือ การกำหนดเวลาเริ่มต้นวิเคราะห์ และค่าสำคัญที่ต้องให้ถูกต้องคือ Frame rate เป็นค่าอัตราส่วนของภาพต่อหนึ่งวินาที ซึ่งตั้งไว้ขณะบันทึกวิดีโอ รูปที่ 3 วิดีโอถูกบันทึกที่อัตรา 300 เฟรมต่อวินาที ดังนั้นภาพ 1 เฟรม dt มีค่าเท่ากับ 0.0033 วินาที

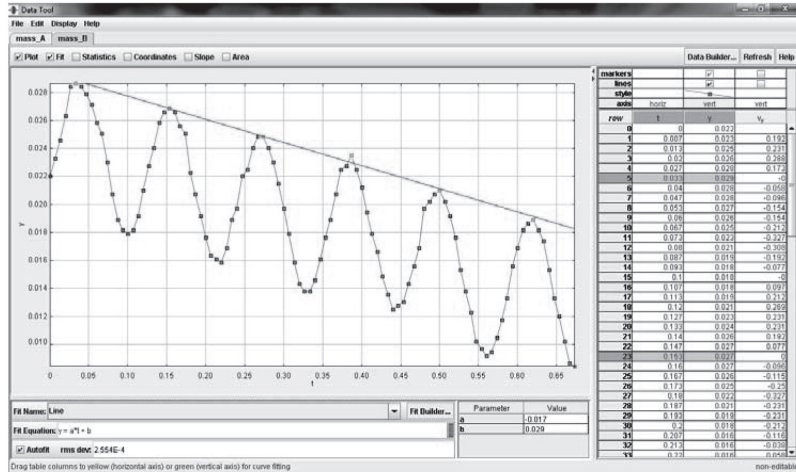


รูปที่ 3 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม Tracker ที่ทำการวิเคราะห์วิดีโอ woodpecker toy

**ขั้นที่ 3 กำหนดแกนและความยาวอ้างอิง** การวิเคราะห์ทางฟิสิกส์ต้องมีพิกัดและความยาวอ้างอิง เพื่อใช้กำหนดค่าตำแหน่งของวัตถุที่พิจารณา การกำหนดแกนอ้างอิงกดที่ปุ่ม  หรือเลือก Tracks > Axis > Visible จะปรากฏเส้นสี่มุมพู่เข็มตั้งฉากกัน (ดังรูปที่ 3) แกนในแนวนอนที่มีขีดสั้นแสดงถึงแกน +x เมื่อกดที่จุดตัดของเส้นจะปรากฏรูปสี่เหลี่ยม แสดงว่าสามารถย้ายแกนไปยังตำแหน่งใดๆ ที่ผู้ใช้ต้องการให้เป็นจุดกำเนิด สำหรับการกำหนดความยาวอ้างอิงให้กดปุ่ม  หรือเลือก Tracks > Tape > Visible จะปรากฏลูกศรหัวท้ายสีน้ำเงินพร้อมช่องระบุตัวเลขความยาว ผู้ใช้สามารถเลื่อนตำแหน่งของลูกศรโดยกดเลือกที่ลูกศรแล้วลากไปวางยังตำแหน่งที่ทราบความยาว เมื่อกดเลือกที่หัวลูกศรด้านใดด้านหนึ่งสามารถหมุนลูกศรให้ทำมุม  $\theta$  ใดๆ กับแกน x หากต้องการระบุความยาวใหม่สามารถเปลี่ยนค่าที่ช่อง “scaled length” หน่วยของความยาวขึ้นอยู่กับตัวเลขที่ระบุค่า เช่น ในรูปที่ 3 ความยาวจริงเป็น 3.0 เซนติเมตร ถ้าต้องการให้หน่วยของความยาวอ้างอิงเป็นหน่วยเมตรต้องพิมพ์ 0.03 และหากต้องการกำหนดมุมให้ระบุค่าที่ช่อง “angle form x-axis” โดยมุมมีหน่วยเป็นองศาเทียบกับแกน x

**ขั้นที่ 4 ระบุตำแหน่งของวัตถุ** เป็นการกำหนดจุดแทนตำแหน่งของวัตถุในแต่ละเฟรม กดที่ปุ่ม  จะปรากฏแถบเครื่องมือ Track control จากนั้นเลือก New > Point Mass แสดงถึงวัตถุเป็นจุดมวลที่แถบเครื่องมือมีช่องให้ระบุค่ามวลหน่วยเป็นกิโลกรัม ถ้าวิเคราะห์ในเชิงจลน์ศาสตร์ไม่จำเป็นต้องระบุมวลเพื่อความสะดวกในการระบุตำแหน่ง ผู้ใช้สามารถซ่อนแกนพิกัดและลูกศรแสดงความยาว โดยกดที่ปุ่มแกนและความยาวซ้ำอีกครั้ง การระบุตำแหน่งของวัตถุให้กดปุ่ม Shift บนแป้นพิมพ์ค้างไว้ เครื่องหมายแสดงตำแหน่งเมาส์จะเปลี่ยนเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีเครื่องหมาย + ตรงกลาง ให้นำไปวาง ณ ตำแหน่งของวัตถุแล้วคลิกขวา เมื่อกดเลือกตำแหน่งแรกแล้วเฟรมวิดีโอจะเลื่อนไปที่เฟรมถัดไปโดยอัตโนมัติ และปรากฏเครื่องหมายแสดงตำแหน่งของวัตถุในเฟรมก่อนหน้าเพื่อแสดงแนวการเคลื่อนที่ของวัตถุ เมื่อทำการระบุตำแหน่งวัตถุไปจนถึงเฟรมสุดท้ายของการเคลื่อนที่หรือเฟรมสุดท้ายที่กำหนดไว้ในช่อง “End frame” จะได้แนวการเคลื่อนที่ของวัตถุ และทางด้านขวาบนแสดงกราฟการเคลื่อนที่แสดงตำแหน่งในแนวแกน x กับเวลา และทางด้านขวาล่างมีตารางแสดงเวลาและตำแหน่งวัตถุในแนวแกน x และ y ผู้ใช้สามารถเพิ่มจำนวนกราฟที่แสดงเป็นสามกราฟได้เลือก Plots > 3 และสามารถเปลี่ยนตัวแปรตามแนวแกน x และ y โดยคลิกบนตัวแปรจะปรากฏหน้าต่างตัวแปรให้เลือก และสามารถแสดงกราฟระหว่างตัวแปรต่างๆ ได้ดังรูปที่ 3

**ขั้นที่ 5 วิเคราะห์กราฟ** จุดเด่นของโปรแกรม Tracker คือ สามารถ Fit curve ข้อมูลจากการระบุตำแหน่งด้วยสมการคณิตศาสตร์ที่มักพบในระบบทางฟิสิกส์ โดยคลิกขวาบนกราฟแล้วเลือก > Analyze.. จะปรากฏหน้าต่าง Data Tool ดังรูปที่ 4 แสดงการกระจัดสูงสุดในแนวแกน y ของตุ๊กตาทองที่ลั่นกลับไปมาและเคลื่อนที่ลงตามแนวตั้ง และ Fit curve ด้วยสมการเส้นตรงทำให้หาค่าอัตราเร็วการเคลื่อนที่ลงตามแนวตั้งของตุ๊กตาได้ประมาณ 0.017 เมตร/วินาที (ค่าพารามิเตอร์ a) นอกจากนี้สามารถเลือกสมการอื่นที่ต้องการ Fit curve จากช่อง Fit Name เช่น Parabola, Cubic, Gaussian, Exponential, และ Sinusoid



รูปที่ 4 แสดงหน้าต่าง Data Tool สำหรับวิเคราะห์กราฟของโปรแกรม Tracker

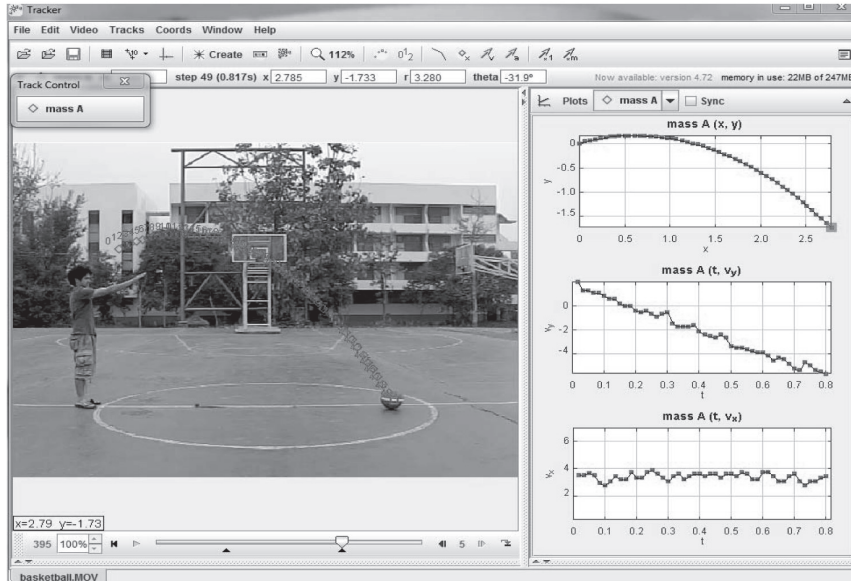
โปรแกรม Tracker มีฟังก์ชันสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของวัตถุเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง โดยเลือกจากแถบเครื่องมือ Track Control เลือก Tracks > New > จะปรากฏแถบออกมา สามารถเลือกแบบจำลองได้สองแบบ คือ Kinematic Particle Model หรือ Dynamic Particle Model ขึ้นอยู่กับว่ามีสมการอธิบายการเคลื่อนที่ในเชิงจลนศาสตร์หรือพลศาสตร์ แต่อาจต้องเพิ่มค่าตัวแปรทำได้โดยการเลือก Add ค่าตัวแปร (parameter) เช่น ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ( $g = 9.8$  เมตร/วินาที<sup>2</sup>) เพราะโปรแกรม Tracker ไม่มีค่าคงที่เหล่านี้ในโปรแกรม

### ตัวอย่างการวิเคราะห์วิถีโอบิตราเร็วสูงในกลศาสตร์ด้วยโปรแกรม Tracker

โปรแกรม Tracker พัฒนาโดยนักฟิสิกส์ จึงเป็นที่นิยมใช้วิเคราะห์สถานการณ์ทางฟิสิกส์ ในหัวข้อนี้ยกตัวอย่างการวิเคราะห์วิถีโอบิตราแสดงหลักการฟิสิกส์พื้นฐาน ได้แก่ การเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์ การกลิ้งโดยไม่ไถล และการแกว่งกวัด สำหรับตัวอย่างวิถีโอบิตราที่อัตราเร็ว 300 เฟรมต่อวินาที

#### การเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์

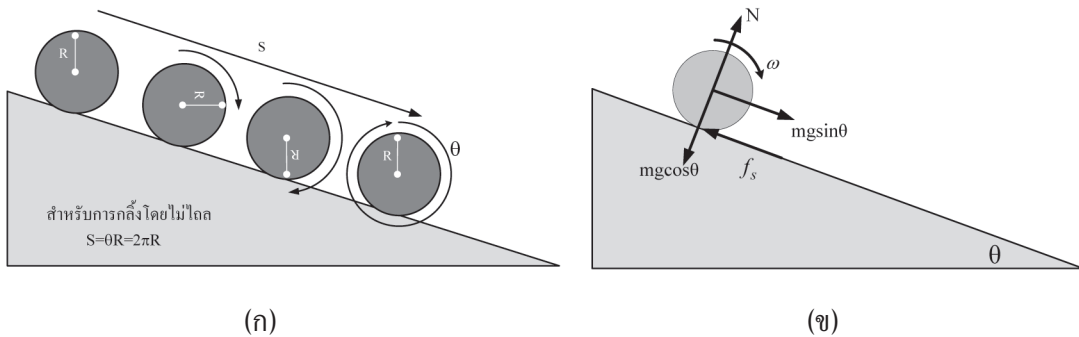
ในรูปที่ 5 เป็นวิถีโอบิตราเคลื่อนที่ของลูกบาสเกตบอลแบบโพรเจกไทล์ เครื่องหมาย  $\diamond$  แสดงตำแหน่งของลูกบาสเกตบอลในแต่ละเฟรมหลังจากที่หลุดออกจากมือของผู้ขว้างจนตกกระทบพื้น กราฟระหว่างตำแหน่งในแนวดิ่ง ( $y$ ) และในแนวระดับ ( $x$ ) เป็นแบบพาราโบลา ส่วนกราฟระหว่างความเร็วในแนวดิ่ง ( $v_y$ ) และเวลา ( $t$ ) เป็นเส้นตรงที่ค่าความชันติดลบ แสดงว่าลูกบาสเกตบอลเคลื่อนที่ด้วยความเร่งมีค่าติดลบ ซึ่งสามารถใช้ฟังก์ชัน Data Tool ในโปรแกรม Tracker พล็อตกราฟกับสมการเส้นตรง และหาค่าความชันของกราฟเปรียบเทียบกับค่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ( $g$ ) ได้ ส่วนกราฟระหว่างความเร็วในแนวระดับ ( $v_x$ ) และเวลาเป็นเส้นตรงในแนวระดับแสดงว่าไม่มีความเร่งในแนวระดับ เพราะกราฟมีความชันเป็นศูนย์



รูปที่ 5 แสดงการวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์ด้วยโปรแกรม Tracker

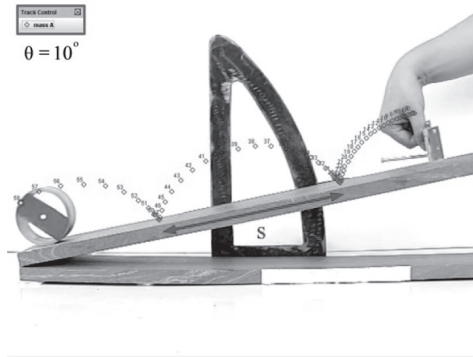
**การกลิ้งโดยไม่ไถล**

การกลิ้งเป็นการเคลื่อนที่ซึ่งวัตถุมีทั้งการหมุน (rotation) และการเลื่อนที่ (translation) ไปพร้อมกัน การกลิ้งโดยไม่ไถลจะเกิดก็ต่อเมื่อเป็นไปตามสองเงื่อนไข ได้แก่ เงื่อนไขที่หนึ่ง คือ การกระจัดเชิงเส้นของการเคลื่อนที่ ( $S$ ) เท่ากับมุม ( $\theta$ ) คูณกับรัศมี ( $R$ ) ถ้าวัตถุหมุนครบหนึ่งรอบการกระจัดเชิงเส้นเท่ากับเส้นรอบวงของวัตถุ ( $S = 2\pi R$ ) ดังรูป 6 (ก) และเงื่อนไขที่สอง คือ งานเนื่องจากแรงเสียดทานสถิตเท่ากับศูนย์ ทำให้พลังงานกลรวมของวัตถุมีค่าคงที่

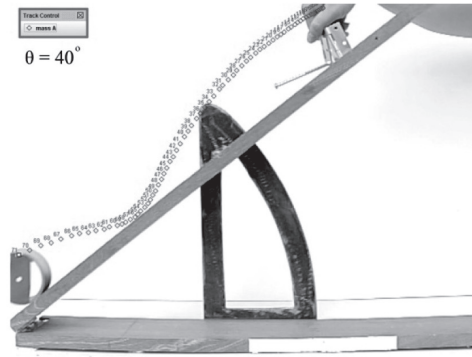


รูปที่ 6 (ก) แสดงการกลิ้งของทรงกระบอกตันครบหนึ่งรอบ  
 (ข) แสดงแผนภาพแรงที่กระทำต่อทรงกระบอกตันขณะกลิ้งโดยไม่ไถลลงตามพื้นเอียง [11]

สำหรับเงื่อนไขที่หนึ่งสามารถใช้โปรแกรม Tracker แสดงการกระจัดเชิงเส้นของจุดใดๆ บนวัตถุ ถ้าเป็นไปตามเงื่อนไขที่หนึ่งแสดงว่าวัตถุกลิ้งโดยไม่ไถลดังรูปที่ 7 (ก) แต่ถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขหรือ  $S \neq 2\pi R$  แสดงว่าวัตถุกลิ้งและไถลดังรูปที่ 7 (ข)



(ก)



(ข)

**รูปที่ 7** แสดงการกระจัดเชิงเส้นของทรงกระบอกกลวง (มวล 294.13 g รัศมีภายใน 3.5 cm และรัศมีภายนอก 4.0 cm) กลิ้งลงพื้นเอียงที่มุม (ก)  $10^\circ$  (กลิ้งโดยไม่ไถล) (ข)  $40^\circ$  (กลิ้งและไถล) [11]

ในกรณีที่ทรงกระบอกตันกลิ้งลงจากพื้นเอียง แรงที่กระทำต่อทรงกระบอกตันประกอบด้วย แรงโน้มถ่วงซึ่งแสดงในลักษณะส่วนประกอบของแรงในแนวตั้งฉากกับพื้นเอียง ( $mg \cos\theta$ ) และแรงในแนวขนานกับพื้นเอียง ( $mg \sin\theta$ ) แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส ( $N$ ) และแรงเสียดทานสถิต ( $f_s$ ) ดังแสดงในรูป 6 (ข) สำหรับสมการการเคลื่อนที่เชิงเส้นตามแกนที่ขนานและตั้งฉากกับพื้นเอียงเป็นดังสมการ

$$mg \sin\theta - f_s = ma \quad (2)$$

$$N - mg \cos\theta = 0 \quad (3)$$

สำหรับการหมุนรอบจุดศูนย์กลางมวลสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ก ( $\tau$ ) และโมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกตัน ( $I$ ) และความเร่งเชิงมุม ( $\alpha$ ) ได้ดังนี้

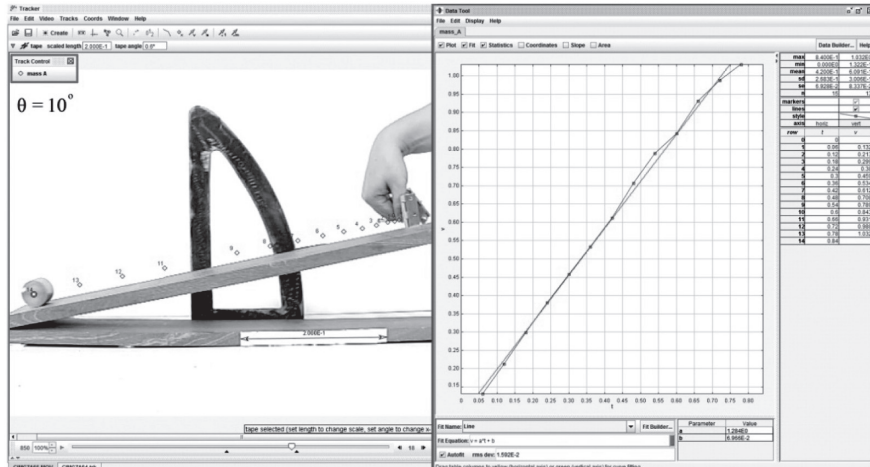
$$f_s R = I\alpha = \frac{1}{2} mR^2 \alpha \quad (4)$$

แทนค่าความสัมพันธ์ของแรงเสียดทานสถิตและแรงปฏิกิริยาตั้งฉาก ( $f_s = \mu_s N$ ) ใช้ค่า  $N$  จากสมการที่ (3) สามารถหาความเร่งของจุดศูนย์กลางมวลของทรงกระบอกได้ดังนี้

$$a = \frac{2}{3} g \sin\theta \quad (5)$$



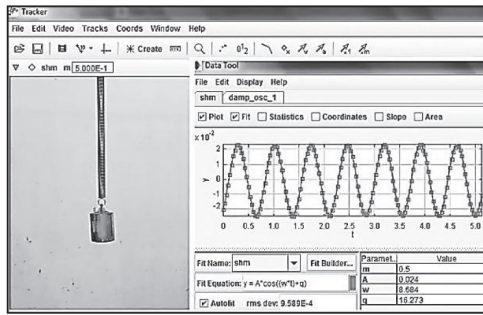
จากสมการ (5) ที่มุมพื้นเอียง  $10^\circ$  ค่าความเร่งของทรงกระบอกตันกลิ้งลงพื้นเอียงเท่ากับ  $1.13 \text{ m/s}^2$  สำหรับค่าความเร่งจากการทดลองใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงและใช้ฟังก์ชัน Data Tool (ดังรูปที่ 8) ในโปรแกรม Tracker วิเคราะห์หาความเร่งโดยฟิตเชิงเส้น (Linear fit) กับกราฟความเร็วในแนวนอนกับพื้นเอียงกับเวลาด้วยสมการ  $v = a*t + b$  ดังรูปที่ 8 คำนวณความเร่งจากค่าพารามิเตอร์  $a$  ได้เท่ากับ  $1.105 \text{ m/s}^2$  ซึ่งคลาดเคลื่อนจากค่าความเร่งจากทฤษฎี 2.4%



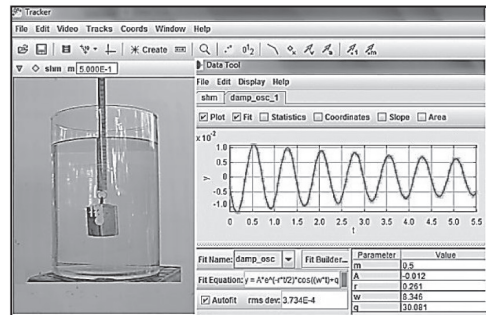
รูปที่ 8 ใช้ฟังก์ชัน Data Tool ในโปรแกรม Tracker วิเคราะห์กราฟความเร็วในแนวนอนกับพื้นเอียงและเวลาเพื่อหาค่าความเร่งจากการทดลอง [11]

### การแกว่งกวัด

การศึกษาการแกว่งกวัด (oscillation) ด้วยเทคนิควิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงโดยใช้โปรแกรม Tracker ใช้มวล 500 g แขนงจากสปริงให้สั้นในอากาศดังรูปที่ 9 (ก) มวลมีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย (Simple Harmonic Motion, SHM) ดังแสดงในกราฟระหว่างตำแหน่งในแนวดิ่ง ( $y$ ) เทียบกับเวลา ( $t$ ) ที่แอมพลิจูดของการแกว่งกวัดมีค่าคงที่และมวลเคลื่อนที่ตามสมการฮาร์มอนิกอย่างง่าย  $y(t) = A\cos(\omega t + \phi)$  เมื่อ  $A$  คือแอมพลิจูดของการสั่น,  $\omega$  คือความถี่เชิงมุม และ  $\phi$  คือมุมเฟส ใช้ฟังก์ชัน Data Tool ฟิตกราฟ sinusoidal ได้ค่า  $A = 24 \text{ cm}$ ,  $\omega = 8.68 \text{ rad/s}$  และ  $\phi = 16.27 \text{ rad}$  ในรูปที่ 9 (ข) แสดงการแกว่งกวัดแบบหน่วง (Damped oscillation) ของมวลในน้ำ แรงต้านจากน้ำทำให้แอมพลิจูดของการแกว่งกวัดลดลง สังเกตได้จากกราฟระหว่าง  $y$  และ  $t$  เมื่อใช้ฟังก์ชัน Data Tool ฟิตกราฟด้วยสมการ  $y(t) = A\exp(-\gamma t/2)\cos(\omega t + \phi)$  เมื่อ  $\gamma$  คือค่าคงที่ความหน่วงได้ค่าพารามิเตอร์  $A = -1.2 \text{ cm}$ ,  $\gamma = 0.261$ ,  $\omega = 8.346 \text{ rad/s}$  และ  $\phi = 30.68 \text{ rad}$



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 แสดงการแกว่งกวัดของมวล 500 g แขนงจากสปริงและเส้นใน (ก) อากาศ (ข) น้ำ [37]

### ความคลาดเคลื่อนในการบันทึกวิดีโอ

ความคลาดเคลื่อนในการบันทึกวิดีโอเป็นผลมาจากหลายปัจจัย แต่ความคลาดเคลื่อนหลักเป็นผลมาจากการกำหนดจุดระบุตำแหน่งของวัตถุและการบิดเบี้ยวของเลนส์

### ความคลาดเคลื่อนในการกำหนดจุดระบุตำแหน่งของวัตถุ

การกำหนดจุดระบุตำแหน่งที่คลาดเคลื่อนก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนสะสม (accumulated error) เช่น ถ้ากำหนดตำแหน่งวัตถุคลาดเคลื่อน การนำค่าตำแหน่งไปคำนวณต่อเพื่อหาค่าความเร็วและค่าความเร่งจะมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นตามลำดับ งานวิจัยส่วนใหญ่ไม่มีการแก้ไขความคลาดเคลื่อนนี้ มีเพียงบางงานวิจัยที่แก้ไขความคลาดเคลื่อนของข้อมูล เช่น Cross [17] ศึกษาฟิสิกส์ของการขว้างวัตถุ ซึ่งระบุว่าการนำค่าตำแหน่งตามแกน  $x$  และ  $y$  ของวัตถุไปคำนวณค่าความเร็ว  $v_x$  และ  $v_y$  และจากค่าความเร็วนำไปคำนวณค่าความเร่ง  $a_x$  และ  $a_y$  ถ้ามีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยของค่าพิกัด  $(x, y)$  สามารถทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนอย่างมากของค่า  $(a_x, a_y)$  หรือความคลาดเคลื่อนจากการระบุตำแหน่งเพียง 2 หรือ 3 มิลลิเมตร ในแนวแกน  $y$  ทำให้ได้ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงมากขึ้นหรือน้อยลงเป็น 2 เท่าของค่าที่ยอมรับได้ Cross ได้เสนอให้คำนวณค่าความเร็วและค่าความเร่งในสองช่วงเวลา คือ เวลาก่อนเริ่ม ( $t < 0$ ) และเวลาหลังเริ่ม ( $t > 0$ ) และจับคู่ส่วนประกอบของสมการทั้งสองช่วง ณ เวลา  $t = 0$  ดังสมการด้านล่าง

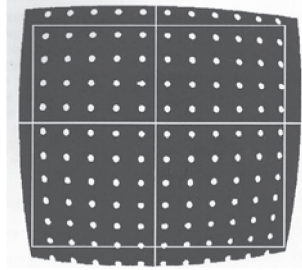
$$x = \begin{cases} v_{x0}t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 + b_5t^5 + b_6t^6 & (t < 0) \\ v_{x0}t & (t > 0) \end{cases}$$

$$y = \begin{cases} v_{y0}t + c_2t^2 + c_3t^3 + c_4t^4 + c_5t^5 + c_6t^6 & (t < 0) \\ v_{y0}t - 4.9t^2 & (t > 0) \end{cases}$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์  $b$  และ  $c$  หาจากการฟิตเส้นโค้งด้วยสมการพหุนาม และค่า  $v_{x0}$  และ  $v_{y0}$  เป็นค่าความเร็วเริ่มต้น ณ เวลา  $t = 0$  คำนวณหาอนุพันธ์ลำดับที่สองเทียบกับเวลาของ  $x$  และ  $y$  จากการจับคู่และให้  $b_2 = 0$  และ  $c_2 = -4.9$  ดังนั้น  $a_x = 0$  และ  $a_y = -9.8 \text{ m/s}^2$  ณ เวลา  $t = 0$  วิธีนี้ทำให้สามารถแก้ไขความคลาดเคลื่อนสะสมได้

### การบิดเบี้ยวของเลนส์

การบิดเบี้ยวของเลนส์ (lens distortion) เกิดจากเลนส์วัตถุในกล้องที่บันทึกวิดีโอมีความยาวโฟกัสน้อยหรือเป็นเลนส์มุมกว้าง ทำให้ภาพที่บันทึกมีการบิดเบี้ยวเนื่องจากเลนส์ดังรูปที่ 5 ถ้าการเคลื่อนที่ของวัตถุอยู่บริเวณกึ่งกลางไม่จำเป็นต้องพิจารณาการบิดเบี้ยวของเลนส์ แต่ในกรณีที่วัตถุมีการเคลื่อนที่ใกล้ขอบหรือมีการบันทึกวิดีโอในมุมกว้างจำเป็นต้องพิจารณาการบิดเบี้ยวของภาพเนื่องจากเลนส์



**รูปที่ 10** การบิดเบี้ยวแปลงให้จุดที่เคยเรียงตัวเป็นเส้นตรง กลายเป็นเส้นที่โค้งเล็กน้อย [38]

### สรุป

เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ กล้องที่มีฟังก์ชันบันทึกวิดีโออัตราเร็วสูงและโปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอ เทคนิคนี้ใช้ศึกษาการเคลื่อนที่ทั้งในสาขาชีววิทยาและสาขาฟิสิกส์ โดยเฉพาะงานวิจัยทางด้านกลศาสตร์ ในบทความนี้ได้นำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับประเด็นสำคัญเพื่อเลือกใช้กล้องดิจิทัลและโปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอที่เหมาะสมกับงานวิจัย รวมถึงการจัดองค์ประกอบฉากเพื่อบันทึกวิดีโอที่มีความคมชัดและใช้ได้กับโปรแกรมวิเคราะห์ ทั้งนี้คณะผู้เขียนได้นำเสนอการใช้งานโปรแกรม Tracker ซึ่งดาวน์โหลดได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายและใช้งานได้ไม่ยุ่งยาก และเหมาะกับการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ รวมถึงตัวอย่างการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงด้วยโปรแกรม Tracker ด้วยหวังว่าเนื้อหาในบทความนี้จะประโยชน์และเป็นแนวทางให้ผู้อ่านเริ่มใช้เทคนิควิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงในการเรียนการสอนกลศาสตร์หรือในหัวข้ออื่นทางฟิสิกส์ต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

1. Heck, A. 2009. Bringing Reality into the Classroom. *Teaching Mathematics and its Applications: An International Journal of the IMA* 28(4): 164-179.
2. Heck, A., and Uylings, P. 2009. In a Hurry to Work with High-Speed Video at School. *The Physics Teacher* 35: 340-347.
3. Brown, D., and Cox, A. J. 2009. Innovative Uses of Video Analysis. *The Physics Teacher* 47: 145-150.
4. Chanpichai, N., and Wattanakasiwich, P. 2010. Teaching Physics with Basketball. *Proceedings of International Conference on Physics (ICPE 2009)* 1263: 212-215.
5. Kaewsutthi, C., and Wattanakasiwich, P. 2011. Student Learning Experiences from Drag Experiments Using High Speed Video Analysis. *ACSME Proceedings* 17:181-186.
6. Sato, M. 2010. Motion Analysis of an Object onto Fine Plastic Beads Using High-Speed Camera. *Proceedings of International Conference on Physics (ICPE 2009)* 1263: 122-125.
7. Ishii, K., Kagawa, K., Khumaeni A., and Kurniawan, K. H. 2010. Frictionless Demonstration Using Fine Plastic Beads for Teaching Mechanics. *Proceedings of International Conference on Physics (ICPE 2009)* 1263: 179-182.
8. Labous, L., Rosato, A. D., and Dave, R. N. 1997. Measurement of Collisional Properties of Spheres Using High-Speed Video Analysis. *Physical Review E* 56(5): 5717-5725.
9. Heck, A., and Vonk, R. 2009. You Must Keep Money Moving. *Physics Education* 44(2): 188-196.
10. Eadkhong, T., Rajsadorn, R., Jannual, P., and Danworaphong, S. 2012. Rotational Dynamics with Tracker. *European Journal of Physics* 33(3): 615-622.
11. Phommarach, S., Wattanakasiwich, P., and Johnston, I. D. 2012. Video Analysis of Rolling Cylinders. *Physics Education* 47: 189-196.
12. Bryan, J. A. 2010. Investigating the Conservation of Mechanical Energy Using Video Analysis: Four Cases. *Physics Education* 45: 50-57.
13. Asavapibhop, B., and Suwonjandee, N. 2010. Loop-the-Loop: An Easy Experiment, a Challenging Explanation. *Proceedings of International Conference on Physics (ICPE 2009)* 1263: 249-251.
14. Glawtanong, P., Ritphan, S., Sirisathitkul, C., Yaiprasert, C., and Sirisathitkul, Y. 2011. Studies of Free Falling Object and Simple Pendulum Using Digital Video Analysis. *Walailak Journal of Science and Technology* 8: 63-69.
15. Vollmer, M., and Möllmann, K. 2012. Faster Than  $g$ , Revisited with High-Speed Imaging. *European Journal of Physics* 33(5): 1277-1285.

16. Cross, R. 2005. Bounce of a Spinning Ball near Normal Incidence. *American Journal of Physics* 73(10): 914-920.
17. Cross, R. 2004. Physics of Overarm Throwing. *American Journal of Physics* 72(3): 305-312.
18. Heck, A., and Ellermeijer, T. 2009. Giving Students the Run of Sprinting Models. *American Journal of Physics* 77(11): 1028-1038.
19. Heck, A., Uylings, P., and Kędzierska, E. 2010. Understanding the Physics of Bungee Jumping. *Physics Education* 45(1): 63-73.
20. Bryan, J. 2005. Physics instruction using video analysis technology. Available from URL: [http://apcentral.collegeboard.com/apc/members/courses/teachers\\_corner/48402.html](http://apcentral.collegeboard.com/apc/members/courses/teachers_corner/48402.html). 15 May 2012.
21. Hack, W. N., and Baird, W. H. 2012. Using a High-Speed Camera to Measure the Speed of Sound. *The Physics Teacher* 50: 45-47.
22. Truong, T. V., Byun, D., Lavine, L. C., Emlen, D. J., Park, H. C., and Kim, M. J. 2012. Flight Behavior of the Rhinoceros Beetle *Trypoxylus Dichotomus* During Electrical Nerve Stimulation. *Bioinspiration & Biomimetics* 7(3): 036021.
23. Lauder, G. V., Madden, P. G., Mittal, R., Dong, H., and Bozkurtas, M. 2006. Locomotion with Flexible Propulsors: I. Experimental Analysis of Pectoral Fin Swimming in Sunfish. *Bioinspiration & Biomimetics* 1(4): S25-34.
24. Vollmer, M., and Möllmann, K. 2011. High Speed and Slow Motion: the Technology of Modern High Speed Cameras. *Physics Education* 46: 191-202.
25. The High Speed Camera Store. Available from URL: <http://www.thehighspeedcamerastore.com>. 18 January 2012.
26. Digital Cameras. Available from URL: [http://www.casio.com/products/Digital\\_Cameras/](http://www.casio.com/products/Digital_Cameras/). 8 March 2012.
27. Canon Thailand. Available from URL: <http://www.canon.co.th>. 12 March 2012.
28. Samsung imaging. Available from URL: <http://www.samsungimaging.com>. 12 March 2012.
29. Nikon 1 imaging. Available from URL: <http://nikon1.nikon.co.th>. 12 October 2012.
30. Lenox Softworks. 2011. VideoPoint. Available from URL: <http://www.vpfundamentals.com>. 15 March 2012.
31. Vernier Software & Technology. 2011. Logger Pro 3. Available from URL: <http://www.vernier.com/product/software/>. 13 March 2012.
32. Centre for Microcomputer Applications. Coach 6 Studio MV. Available from URL: <http://www.cma.science.uva.nl>. 15 March 2012.

33. Learning in Motion Inc. 2008. Measurement in Motion. Available from URL: <http://www.learn.motion.com/products/measurement/index.html>. 20 July 2012.
34. Carlson, R. 2011. Physics Toolkit. Available from URL: <http://www.physicstoolkit.com/>. 20 July 2012.
35. Carlson, G.A. 2003. DataPoint. Available from <http://www.xannah.org/datapoint>. 20 July 2012.
36. Brown, D. 2012. Tracker. Available from URL: <http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/>. 18 March 2012.
37. Poonyawatpornkul, J., and Wattanakasiwich, P. 2012. Linking Classical Mechanics to Real World Events with High Speed Videos. *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Asean Plus Three Graduate Research Congress* (In Press).
38. Page, A., Moreno, R., Candelas, P., and Belmar, F. 2008. The Accuracy of Webcams in 2D Motion Analysis: Sources of Error and their Control. *European Journal of Physics* 29: 857-870.

ได้รับบทความวันที่ 8 พฤษภาคม 2555  
ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 30 ตุลาคม 2555