

กล้องและเซนเซอร์ พีเอ็มดี: ความเป็นมา หลักการทำงานและการประยุกต์ใช้ในงานวิจัยทางด้านหุ่นยนต์

นिरมล เรืองพยุงศักดิ์¹

บทคัดย่อ

เร็วๆ นี้ ภาพความลึกหรือภาพสามมิติ ได้เข้ามามีบทบาทในการแก้ปัญหาในทางอุตสาหกรรม ทาง การแพทย์ ทางด้านโลจิสติกส์มากขึ้น เช่น การตรวจวัดขนาดของชิ้นงาน การหยิบและวางชิ้นงาน การควบคุม การเคลื่อนที่ของแขนกลอัตโนมัติ เป็นต้น แม้ว่าภาพ ความลึก สามารถหาได้จากการประมวลผลภาพ ด้วย กล้องโมโน กล้องสเตอริโอ หรือเซนเซอร์วัดระยะทาง แต่เนื่องจากกล้อง TOF ที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อจับภาพความ ลึกนั้นง่ายในการใช้งาน และไม่ต้องทำการประมวลผล มากนัก จึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก บทความนี้ มีเป้าหมายเพื่อนำเสนอกำลัง และเซนเซอร์พีเอ็มดี เพื่อกระตุ้นให้นักวิจัยตระหนักถึงเทคโนโลยีภาพสามมิติ

ที่ทันสมัย กล้องพีเอ็มดีเป็นกล้องวัดระยะเวลาสะท้อน กลับ (TOF) ที่มีศักยภาพสูง ที่ให้ข้อมูลภาพความลึก ทั้งเซนเซอร์และกล้องพีเอ็มดี ได้รับการวิจัยและพัฒนา อย่างต่อเนื่อง สามารถประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม ต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งเพื่อเป็นแนวทาง ให้กับนักวิจัยรุ่นใหม่ บทความนี้จึงได้รวบรวมข้อมูลของ เซนเซอร์และกล้องพีเอ็มดีรุ่นต่างๆ หลักการทำงานเบื้องต้น และการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยทางด้านหุ่นยนต์

คำสำคัญ: กล้องพีเอ็มดี เซนเซอร์พีเอ็มดี กล้องวัด ระยะเวลาสะท้อนกลับ ภาพความลึก ภาพ สามมิติ หุ่นยนต์

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 8222 อีเมล: niramonr@kmutnb.ac.th



PMD Camera and Sensor: History, Principles and Applications in Robotics Research

Niramom Ruangpayoongsak¹

Abstract

Recently, the depth image or 3D image representation has increased its prevalent role in solving a wide range of issues in industries, medical, and logistics including freight measurement, pick and place tasks, and automated robot manipulator control. Even depth images can be obtained by photo processing through mono cameras, stereo cameras or range sensors; TOF cameras receive more interest since they are easy to use for capturing depth images and do not require a large amount of computing power. The objective of this paper is to elucidate the potential and specific aspects of the PMD camera and sensor in order to encourage researchers to

realize state-of-the-art 3D technology. The PMD-system camera is a high performance TOF camera that provides depth images. Both PMD sensor and camera are under ongoing research and development. The camera can be potentially applied for various industries. As a guide for new researchers, this article provides collective information framework concerning various models of PMD sensors and cameras, foundation principles and functions, as well as feasibility and future applications on related robotics research.

Keywords: PMD Camera, PMD Sensor, TOF Camera, Depth Image, 3D Image, Robots

¹ Lecturer, Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Tel. 0-2555-2000 Ext. 8222, E-mail: nirramonr@kmutnb.ac.th

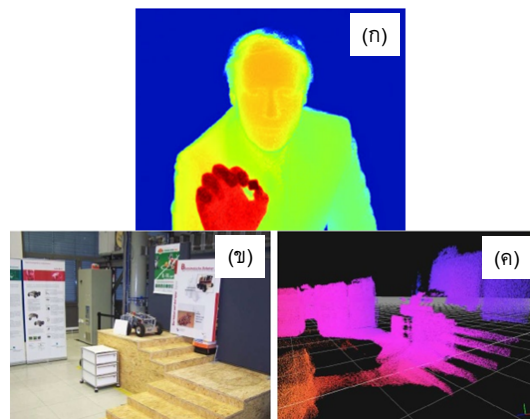
1. บทนำ

กล้อง TOF (Time of Flight) เป็นระบบกล้องที่ให้ภาพความลึกหรือภาพ 3 มิติ ซึ่งให้ข้อมูลระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ ด้วยการวัดเวลาการสะท้อนของสัญญาณแสงบนแต่ละจุดในภาพ กล้อง TOF ถูกนำมาใช้งานโยธา โดยเริ่มต้นเมื่อประมาณปี 2000 ระบบครอบคลุมช่วงของระยะทางไม่กี่เมตร จนถึงประมาณ 60 เมตร ที่ความละเอียดประมาณ 1 เซนติเมตร ความละเอียดของกล้อง TOF โดยปกติจะต่ำกว่ากล้องวีดีโอ 2 มิติ เมื่อเปรียบเทียบกับเลเซอร์สแกน 3 มิติแล้ว กล้อง TOF ทำงานเร็วกว่ามาก สามารถให้ภาพ 100 ภาพต่อวินาที

กล้อง PMD (Photonic Mixer Device) เป็นกล้อง TOF ที่สร้างขึ้นโดยใช้เซนเซอร์ PMD ที่ได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องมากกว่า 2 ทศวรรษ และได้ถูกนำไปใช้งานต่างๆ เช่น ทางด้านอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์อัจฉริยะ ทางด้านลอจิสติกส์ ใช้กล้องเพื่อวัดขนาดน้ำหนักของสินค้าที่ขนส่ง ทำให้สามารถปรับราคาและตำแหน่งของสินค้าในคอนเทนเนอร์ขนาดใหญ่ให้เหมาะสม ใช้ในการยกกล่องหรือสินค้าในโกดังขึ้นบนและยกลงจากแท่นวาง ทางด้านการรักษาความปลอดภัย กล้องถูกใช้เพื่อนับจำนวนคนที่ผ่านประตูรักษาความปลอดภัย นับจำนวนคนที่สนามบิน และในระบบขนส่งมวลชน ทางด้านการแพทย์ กล้องถูกนำมาช่วยในการหาตำแหน่งผู้ป่วยและเฝ้าระวังการเคลื่อนไหวของผู้ป่วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบกายภาพบำบัด รวมถึงรังสีศัลยกรรม และทางด้านการเกษตร ได้มีการนำกล้องมาใช้ในการตรวจสอบสภาพของต้นพืช

ภาพระยะทางหรือภาพความลึกที่ได้จากกล้อง PMD สามารถแสดงได้ด้วยการใช้สีแทนระยะทาง ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) หรือแสดงด้วยกลุ่มของจุด (Point Cloud) ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) นอกจากระยะทางแล้ว กล้องยังสามารถให้ภาพความเข้มของแสง (Intensity Image) จากความเข้มของแสงที่สะท้อนหรือภาพขาวดำอีกด้วย

บทความนี้นำเสนอความเป็นมา หลักการทำงานของเซนเซอร์และกล้อง PMD และงานวิจัยประยุกต์ทางด้านหุ่นยนต์ที่เกี่ยวข้องกับกล้อง PMD ซึ่งเป็นเทคโนโลยี



รูปที่ 1 ภาพความลึกแสดงระยะทางด้วยสี (ก) [1] และกลุ่มของจุด (ค) ที่ได้จากภาพ (ข) [2]

ที่ทันสมัยเพื่อเป็นความรู้ให้กับนักวิจัยรุ่นใหม่และเพื่อให้เกิดแรงจูงใจในการนำเทคโนโลยี PMD ไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาต่างๆ ต่อไป

2. เซนเซอร์ PMD

เซนเซอร์พีเอ็มดีเป็นหัวใจของกล้อง PMD เป็นเซนเซอร์ออปติก ที่มีหลักการทำงานวัดระยะทางจากเวลาการสะท้อนกลับของแสง (Time of Flight: TOF) และมักเรียกว่าเซนเซอร์วัดระยะทางด้วยเวลาการสะท้อนกลับ (TOF Sensor)

ในปี 1996 เซนเซอร์ PMD ซึ่งเป็นซีมอสมาตรฐานได้รับการจดสิทธิบัตรขึ้น เซนเซอร์นี้ถูกเรียกว่า สมาร์ทพิกเซล (Smart-Pixel) เนื่องจากสามารถจับภาพสามมิติในเวลาจริง โดยปราศจากอุปกรณ์ที่เป็นชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ที่ใช้การจับภาพสามมิติด้วยเลเซอร์สแกนเนอร์ นอกจากนี้ เซนเซอร์ PMD ยังให้ข้อมูลความลึกและข้อมูลเกรย์สเกลที่พร้อมใช้งานได้ทันที จึงเหนือกว่าเลเซอร์สแกนเนอร์ในเชิงของสมรรถภาพ การลดแสงรบกวนจากพื้นหลัง ความคล่องตัว ราคาและขนาด

การทำงานของเซนเซอร์ PMD [3] เริ่มต้นด้วยการส่งแสงอินฟราเรดออกไป และวัดระยะเวลาเดินทางของสัญญาณ เนื่องจากระยะเวลาเดินทางของสัญญาณ

แสงสามารถนำมาคำนวณหาระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุสัญญาณแสงที่ถูกปรับเปลี่ยนถูกส่งจากตัวส่ง เช่น แสงอินฟราเรด ทำให้ฉากที่วัดระยะถูกส่องสว่าง แสงที่สะท้อนกลับมาจากฉากมายังเซนเซอร์พีเอ็มดี ถูกทำให้โฟตอนอิเล็กทรอนิกส์แยกตัวออกจากสัญญาณอ้างอิงเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอุปติงที่วัดได้ และสัญญาณอ้างอิงอิเล็กทรอนิกส์ จะได้สัญญาณเข้าที่พู่ทของเซนเซอร์ที่ปรากฏการเลื่อนของเฟส จากนั้นจึงทำการคำนวณหาระยะทาง ข้อดีที่โดดเด่นของระบบ PMD คือ การกำจัดแสงที่แปลกปลอมได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น รังสีแสงอาทิตย์ สัญญาณที่ถูกส่งออกไปจะถูกกรองออกจากแสงในสภาพแวดล้อม และทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานในสภาพแวดล้อมกลางแจ้งได้

ตารางที่ 1 เซนเซอร์ PMD รุ่นต่างๆ [4]

ปีที่เปิดตัว	ชื่อสินค้า	ความละเอียดภาพ (พิกเซล)	จุดเด่น
2003	PhotonICS® 1k-S	64x16	สามารถตรวจจับพื้นหลังซึ่งเป็นเหตุการณ์สำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้กลางแจ้ง ในสภาพแวดล้อมที่ทรหด เช่น ใช้ในความปลอดภัยของรถยนต์
2004	PhotonICS® 3k-S	64x48	สำหรับอุตสาหกรรมการผลิต การพัฒนาสินค้าในการผลิตและระบบอัตโนมัติ
2006	PhotonICS® 1k-S3 PhotonICS® 3k-S2	64x16 64x48	สำหรับการประยุกต์ใช้กับรถยนต์ สำหรับอุตสาหกรรมการผลิต
2012	PMD PhotonICS® 19k-S3	160x120	ชิป 3D TOF แรกของโลกสำหรับนักพัฒนาและนักรวบรวมระบบ

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความละเอียดภาพและจุดเด่นของเซนเซอร์ PMD รุ่นต่างๆ จากอดีตจนถึงปัจจุบัน เซนเซอร์รุ่นใหม่ที่สุดซึ่งเปิดตัวในปี 2012 ได้แก่ PMD



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2 (ก) กล้อง PMD[vision]® CamBoard nano [4]
(ข) กล้อง SwissRanger SR-3000 [6]
(ค) กล้อง SwissRanger SR-4000 [6]
(ง) กล้อง PMD [vision]® CamCube [6]

PhotonICS® 19k-S3 มีความละเอียด 160x120 พิกเซล และเป็นชิป TOF สามมิติอันแรกของโลกที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้งานสำหรับนักพัฒนาและนักรวบรวมระบบ ได้ถูกนำมาสร้างกล้อง PMD[vision]® CamBoard Nano ดังแสดงในรูปที่ 2(ก) ซึ่งเป็นกล้อง TOF ที่เล็กที่สุดในโลกโดยมีขนาดเพียง 37x30x25 มิลลิเมตรเท่านั้น

3. กล้อง PMD

นอกจากเซนเซอร์ PMD ที่เป็นองค์ประกอบหลักของกล้อง PMD แล้ว ภายในกล้องยังประกอบด้วย หน่วยส่องสว่าง เลนส์อุปติง ชุดขับอิเล็กทรอนิกส์ หน่วยคำนวณ และเชื่อมต่อ [3] หน่วยส่องสว่าง ทำหน้าที่ส่องแสงไปยังฉาก หรือวัตถุ แสงจะถูกปรับเปลี่ยนให้มีความเร็วถึง 100 เมกะเฮิร์ซ โดยปกติการส่องสว่างมักใช้รังสีอินฟราเรดเพื่อทำให้เกิดการส่องสว่างที่ทะลุทะลวง เลนส์อุปติงทำหน้าที่จับแสงสะท้อน และภาพของสิ่งแวดล้อมบนเซนเซอร์ภาพ โดยให้เฉพาะแสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากับแสงของหน่วยส่องสว่างผ่านชุดขับอิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่ขับหน่วยส่องสว่างและเซนเซอร์ PMD ด้วยสัญญาณความเร็วสูง สัญญาณเหล่านี้ต้องมีความแม่นยำสูงมาก

เพื่อให้ได้ความละเอียดสูง ส่วนหน่วยคำนวณทำหน้าที่ในการคำนวณระยะทางจากสัญญาณแสงที่ได้ และจัดให้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกด้วยพอร์ตยูเอสบี หรืออีเทอร์เน็ต เซนเซอร์ PMD ได้ถูกวิจัยและพัฒนามากกว่า 10 ปีก่อนการเปิดตัวเป็นกล้อง TOF เชิงพาณิชย์ตัวแรกของโลกในปี 2001 [5] ได้แก่กล้อง SwissRanger ต่อมาทั้งกล้อง SwissRanger และ PMD[vision]® รุ่นต่างๆ ผลิตขึ้นจากเซนเซอร์ PMD เช่น กล้อง SwissRanger SR-3000 และ SR-4000 ดังรูปที่ 2(ข) และ 2(ค)

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบกล้องรุ่นต่างๆ จากอดีตจนถึงปัจจุบัน กล้องที่มีความละเอียดสูงสุดในปัจจุบัน ได้แก่ PMD[vision]® CamCube ดังแสดงในรูปที่ 2(ง) ซึ่งมีความละเอียดภาพ 204x204 พิกเซล เปิดตัวขึ้นในปี 2009 และได้จัดบันทึกโลกสำหรับเทคโนโลยีโซลิตสเทท TOF สามมิติ

ตารางที่ 2 กล้อง PMD รุ่นต่างๆ ที่มีความโดดเด่น [4], [5]

ปีที่เปิดตัว	ชื่อสินค้า	ความละเอียดภาพ (พิกเซล)	จุดเด่น
2003	SwissRanger SR-2	124x160	ได้รับรางวัล Swiss Technology Award และ IST Grand-Price Award
2005	SwissRanger SR-3000	176x144	ความละเอียดภาพสูง
2008	SwissRanger SR-4000	176x144	สำหรับใช้ในอุตสาหกรรม
2009	PMD[vision]® CamCube	204x204	บันทึกโลกสำหรับเทคโนโลยีโซลิตสเทท TOF สามมิติ
2010	PMD[vision]® CamCube	200x200	กล้อง TOF ตัวแรกของโลกที่เป็นบอร์ดเดี่ยว ใช้ไฟจากพอร์ตยูเอสบี
	ARTTS	176x144	กล้อง TOF สามมิติที่เล็กที่สุดในโลก
2012	PMD[vision]® CamBoard nano	160x120	กล้อง TOF สามมิติที่เล็กที่สุดในโลก

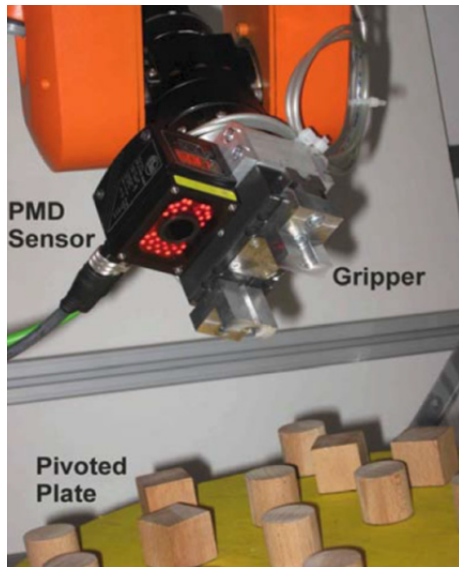
กล้อง PMD ทำงานในเวลาจริงด้วยความเร็วในการถ่ายภาพเทียบเท่ากับกล้องวิดีโอ วัดระยะทางโดยไม่อ้างอิงกับจุดภายนอกกล้อง และไม่อ้างอิงความแตกต่างของสีพื้นผิววัตถุ มีหน่วยส่องสว่างในตัวเอง จึงไม่ต้องอาศัยแสงจากภายนอก และให้ค่าความลึกแต่ละพิกเซลที่นำไปใช้งานได้ทันที สามารถวัดขนาดวัตถุที่มีขนาดใหญ่ได้โดยไม่ต้องปรับความยาวฐาน จึงทำให้กล้อง PMD มีประสิทธิภาพเหนือกว่าทั้งกล้องวิดีโอ 2 มิติ กล้องสเตอริโอและระบบเลเซอร์สแกนเนอร์

4. งานวิจัยประยุกต์ที่เกี่ยวข้องทางด้านหุ่นยนต์

ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา กล้อง PMD ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานวิจัยทางด้านหุ่นยนต์ เช่น แขนกลที่ใช้ในกระบวนการผลิตอัตโนมัติ ในการหาตำแหน่งของชิ้นงาน ให้หุ่นยนต์เรียนรู้การเคลื่อนที่ได้เอง เพื่อพัฒนาการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ระบุตำแหน่งของสิ่งกีดขวาง คำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่และหาตำแหน่งของหุ่นยนต์ การทำแผนที่อาคาร และการหยิบจับวัตถุชนิดต่างๆ

4.1 แขนกล

โดยทั่วไปแขนกลเป็นหุ่นยนต์ชนิดหนึ่งที่มีบทบาทในอุตสาหกรรมการผลิตมาก เช่น ในการเชื่อม การประกอบ การหยิบจับ การจัดเรียงชิ้นงาน เป็นต้น ปัญหาในการควบคุมหุ่นยนต์ ให้ทำงานโดยอัตโนมัติ โดยใช้ข้อมูลภาพความลึก ได้รับความสนใจเป็นอย่างสูงภาพ 3 มิติที่ได้จากเซนเซอร์ PMD ถูกนำไปใช้งานระบบอัตโนมัติในอุตสาหกรรม ในปี 2009 Jaeger et al. [7] นำเสนอการรวมกล้อง 3 มิติและระบบหุ่นยนต์ได้ตอบเข้าด้วยกัน และประเมินเทคโนโลยีสำหรับการประยุกต์ของฉากบน 3 มิติในระบบอัตโนมัติ กล้องให้ภาพบนพื้นฐานของการวัดระยะเวลาระหว่างการกลับ กล้องถูกยึดติดกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรม KUKAKR3 ซึ่งใช้สำหรับเกมรักษาสมดุลได้ตอบ ระหว่างหุ่นยนต์กับผู้เล่นหุ่นยนต์ต้องตอบสนองในสถานการณ์ที่หลากหลาย ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีการวางแผนมาก่อน ซึ่งเป็นการเลียนแบบการหาตำแหน่งชิ้นงาน ในกระบวนการผลิตอัตโนมัติที่มีความยืดหยุ่น



รูปที่ 3 เซนเซอร์ PMD 64x48 พิกเซล ติดตั้งบนแขนกล KUKA KR3 [7]

เนื่องจากหุ่นยนต์ไม่รู้ตำแหน่งของชิ้นส่วนล่วงหน้า

นอกเหนือจากการหาตำแหน่งวัตถุแล้ว ภาพ 3 มิติยังสามารถนำมาใช้เพื่อหาตำแหน่งของแขนกลหรือหุ่นยนต์ได้ด้วย ในขณะที่แขนกลอุตสาหกรรมเคลื่อนที่ การหาตำแหน่งของแขนกลโดยใช้ภาพ ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างแผนที่ และในขณะเดียวกันสามารถปรับปรุงคุณภาพข้อมูลที่ได้จากกล้องด้วย May et al. [2] ประยุกต์ใช้กล้อง SwissRange SR3000 เพื่อสร้างแผนที่ 3 มิติพร้อมทั้งหาตำแหน่งของแขนกล KUKA KR 16 โดยกล้องถูกติดตั้งบนแขนกลและทำการถ่ายภาพมาร์คเกอร์ที่ใช้อ้างอิงตำแหน่ง การสอบเทียบกล้อง 3 มิติร่วมกับกล้องซีซีดีและกรองข้อมูลสามารถพัฒนาความถูกต้องแม่นยำและรวดเร็ว ร่วมกับการใช้อัลกอริทึมซ่อนทับภาพ และปรับปรุงความแม่นยำด้วยการสอบเทียบข้อมูลความลึก

การรับรู้ความลึกของวัตถุในฉาก สามารถเป็นประโยชน์ สำหรับการติดตามหรือประยุกต์ใช้ควบคุมกลไกด้วยภาพ อย่างไรก็ตาม เมื่อกล้องติดตั้งอยู่บนแขนกลระยะทางที่คำนวณ จากภาพความลึกเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไปมาก ด้วยพารามิเตอร์เวลาอินทิเกรชันของกล้อง TOF



รูปที่ 4 ภาพโมเดล 3 มิติที่ได้จากอัลกอริทึมที่นำเสนอ [11]

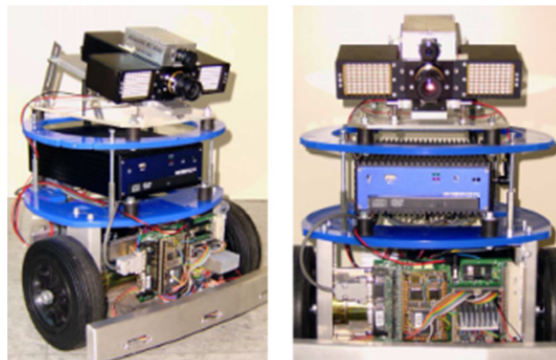
ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อกล้องเคลื่อนที่ ในปี 2010 Gil et al.[8] นำเสนอวิธีการปรับพารามิเตอร์ ตามความเร็วการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และความลึกของเป้าหมาย วิธีที่นำเสนอวิเคราะห์จากพฤติกรรมของพารามิเตอร์ของกล้อง PMD 19k และสามารถใช้กับกล้องรุ่นอื่นๆ ด้วย เมื่อรู้แอมพลิจูดสำหรับแต่ละพิกเซล

ในการเรียนรู้และจดจำการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง มนุษย์ได้รับทักษะการจัดการ โดยการลองผิดลองถูกภายในไม่กี่ครั้ง ในขณะที่การโปรแกรมและความพยายามทางด้านหุ่นยนต์อย่างมาก ในปี 2011 Frank and Hamprecht [9] นำเสนอระบบที่สามารถฝึกฝนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม โดยใช้เพียงการทำซ้ำเพียงไม่กี่ครั้งโดยที่ไม่ถูกรบกวน และปรับค่าพารามิเตอร์โดยอัตโนมัติ ซึ่งใช้ความจริงที่ว่าภาพที่สำเร็จของการฝึกฝนควรใกล้เคียงกับลักษณะพื้นผิวว่าง หลังจากติดตั้งกล้องที่จับภาพเครื่องจักรและระยะทำงานที่ปลอดภัยรอบๆ ตัวมัน ผู้ใช้เพียงต้องให้เครื่องจักรทำงานโดยไม่ถูกรบกวนซ้ำกันไม่กี่ครั้ง ระบบก็จะเรียนรู้และแยกแยะพารามิเตอร์โดยอัตโนมัติ โดยไม่ต้องให้ข้อมูลรายละเอียด ของเรขาคณิตหรือข้อมูลพื้นที่ทำงานของหุ่นยนต์

ในทำนองเดียวกัน Phung et al. [10] นำเสนอหุ่นยนต์ที่เรียนรู้การเคลื่อนที่จากตัวอย่าง ด้วยความสามารถในการสร้างหลักเกณฑ์การเคลื่อนที่ ไปยังเป้าหมายใหม่ และหลีกเลี่ยงการปะทะกับสิ่งกีดขวาง ในพื้นที่ทำงาน เพื่อที่จะปรับการเคลื่อนที่ใหม่ในที่ที่มีสิ่งกีดขวาง ปิดบังการเคลื่อนที่เป็นบางส่วน ซึ่งถูกตรวจจับด้วยกล้อง PMD เช่น การเคลื่อนที่ของลูกปิงปองถูกตรวจจับในระหว่างที่หุ่นยนต์กำลังเคลื่อนที่ ระบบสามารถหลบหลีกลูกปิงปองที่กีดขวางเส้นทางเดิมของปลายแขนกล ในขณะที่คงรูปร่างเส้นทางการเคลื่อนที่ไว้ได้

นอกเหนือจากความสามารถในการเรียนรู้ของหุ่นยนต์ ทางด้านการเคลื่อนที่ เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางแล้ว ทางด้านการหยิบจับวัตถุก็ต้องการความเป็นอัตโนมัติ เช่นกัน การหาโมเดล การตรวจจับ 3 มิติของวัตถุ และการประมาณตำแหน่ง ในส่วนการหาโมเดลของวัตถุ Burrus et al. [11] พัฒนาอัลกอริทึมที่สามารถสร้างรูปร่าง 3 มิติอย่างคร่าวๆ หรือใช้ในการตรวจจับวัตถุ ข้อมูลความลึกจากกล้อง PMD CamCube 2.0 สามารถทำให้การวัดขนาดวัตถุ และการประมาณตำแหน่งในบริเวณที่ใกล้กันคล่องตัวมากขึ้น

การหยิบจับวัตถุที่มีความยืดหยุ่นเช่นใบพืช นับว่าเป็นงานที่ทำหายและค่อนข้างใหม่ ที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีความซับซ้อนกว่าการหาโมเดลและสเตทของวัตถุที่ไม่ยืดหยุ่น ในขณะที่ยุตสาหกรรมอาหารมีความสำคัญมากสำหรับสังคมความพยายามในปัจจุบันในระบบอัตโนมัติให้ความสนใจกับการเฝ้าระวัง และดำเนินการบนพืชชนิดใดชนิดหนึ่งซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของไร่สวนขนาดใหญ่ เช่น การติดตามใบไม้เพื่อหาใบไม้ที่เหมาะสม เพื่อที่จะทำการตรวจสอบ เนื่องจากต้องการระยะที่ใกล้กับพืชมากๆ และการหาจุดตรวจสอบที่เหมาะสมด้วยความแม่นยำสูง Alenya et al. [12] พัฒนาการรู้จำวัตถุที่ยืดหยุ่น เช่น ใบพืช กล้อง CamCube สามารถให้ข้อมูลความลึกที่ระยะทางใกล้สุด 20 เซนติเมตร ความสามารถนี้ทำให้มีความแม่นยำมาก ในกรณีที่มีการหารายละเอียดของวัตถุมีความสำคัญ เช่นการระบุตำแหน่งจุดตรวจสอบบนใบพืช การเฝ้าระวังต้นพืช



รูปที่ 5 หุ่นยนต์ Tom3D ติดตั้งกล้อง PMD [14]

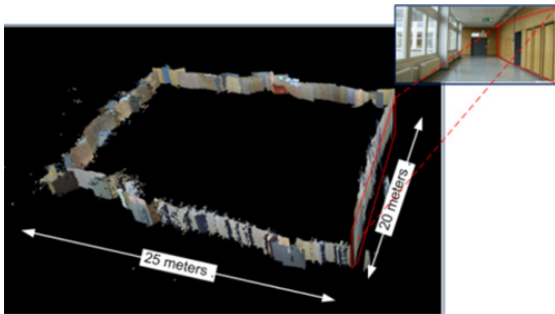
4.2 หุ่นยนต์เคลื่อนที่

หุ่นยนต์เคลื่อนที่ ได้เข้ามามีบทบาทในการค้นหาผู้ประสบภัย หรือทำงานแทนมนุษย์ในการตรวจสอบบริเวณที่มีสารพิษซึ่งเป็นอันตรายต่อชีวิตของมนุษย์และในบริเวณที่ประสบภัยพิบัติ หุ่นยนต์มีภารกิจในการระบุตำแหน่งของผู้ประสบภัย ในขณะที่กล้อง PMD ได้เข้ามามีบทบาทในการหาตำแหน่งหุ่นยนต์ การสร้างแผนที่ และการทดแทนเซนเซอร์วัดระยะทาง

ในปี 2008 Netramai et al. [13] คำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ด้วยการผนวกข้อมูลที่ได้จากกล้อง PMD และกล้องสเตอริโอเข้าด้วยกัน ในขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ ได้ทำการถ่ายภาพจุดสังเกตประติมาตร ซึ่งเป็นจุดอ้างอิงตำแหน่ง กล้องสเตอริโอให้ความแม่นยำในการหาทิศทาง ในขณะที่กล้อง PMD มีความโดดเด่นในการหาการย้ายตำแหน่ง นอกจากนี้ Prusak et al. [14] ผนวกข้อมูลที่ได้จากกล้อง PMD 3k-S 64x48 พิกเซลกับกล้องซีซีดีที่ถ่ายภาพรอบทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 5 เพื่อหาข้อมูลภาพจากกล้องทั้งสอง นำมาใช้เพื่อหาตำแหน่งหุ่นยนต์ หลบหลีกสิ่งกีดขวาง และสร้างแผนที่ 3 มิติ ด้วยการผนวกข้อมูลภาพความลึก เข้ากับภาพสี สามารถสร้างแผนที่ 3 มิติด้วยการซ้อนทับภาพ ในปี 2008 Huhle et al. [15] ใช้กล้อง PMD vision 19k ผนวกกับกล้องสี อัลกอริทึมได้ถูกทดสอบบนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ และทำการสร้างภาพ 3 มิติ โดยอ้างอิงตำแหน่งของหุ่นยนต์จากเซนเซอร์วัดระยะทาง เพื่อสร้างภาพที่เป็นจุด



รูปที่ 6 แผนที่สามมิติที่แสดงด้วยจุดสี [15]



รูปที่ 7 แผนที่ 3 มิติของระเบียบทางเดินในอาคาร [16]

สีในพิกัด 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 6 ในทำนองเดียวกัน ในปี 2011 Bernshausen et al. [16] สร้างแผนที่ 3 มิติ โดยการรวมข้อมูลจากกล้องซีซีดีและกล้อง [PMDVision] S3 camera ที่ติดตั้งบนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ใช้เอนโคเดอร์ร่วมกับเวกเตอร์ภาพ และจุดสังเกตประดิษฐ์ แผนที่ที่สร้างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7

การหาตำแหน่ง และทิศทางของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ จากภาพความลึก เพื่อทดแทนเซนเซอร์วัดระยะทาง ถูกนำเสนอในปี 2010 โดย Ye and Bruch [17] โดยใช้ภาพจากกล้อง SwissRange SR4000 เมื่อภาพความลึกและภาพขาวดำมีความละเอียดเท่ากัน สามารถใช้ภาพขาวดำเพื่อจับคู่ตำแหน่งในภาพ และทำการซ้อนทับภาพความลึก เพื่อคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์



รูปที่ 8 หุ่นยนต์ Rollin' Justin ที่ใช้เทคโนโลยี PMD

4.3 หุ่นยนต์บริการ

หุ่นยนต์บริการมักประกอบด้วยแขนกลกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ เพื่อให้มีความสามารถทั้งในการหยิบจับวัตถุ และเคลื่อนที่มีบทบาทในการดูแล และเฝ้าระวังผู้ป่วย ผู้สูงอายุหรือผู้พิการโดยให้บริการเสิร์ฟอาหาร เครื่องดื่ม ทำงานบ้าน เป็นต้น

ในการหยิบจับชิ้นผ้าที่วางอยู่บนพื้นเรียบนับเป็นงานที่ทำหายอย่างมาก นี่เป็นมุมมองที่สำคัญสำหรับทำให้หุ่นยนต์เป็นอัตโนมัติในสภาพแวดล้อมที่ไม่ได้เตรียมเอาไว้ก่อน ในขณะที่งานวิจัยเก่าที่ผ่านมาจะเชื่อมั่นบนวิธีการแก้ปัญหาที่ไม่มีกฎเกณฑ์ตายตัวแบบง่ายที่ทำงานได้ในสภาพที่จัดเตรียมไว้ก่อน ในปี 2011 Alenya et al. [12] หากการวัดที่ดีของความสามารถในการจับสำหรับวัตถุผ้าที่วางอยู่บนพื้นเรียบ

โลกของหุ่นยนต์ที่เปลี่ยนไปอย่างรวดเร็ว มีการใช้ดวงตาเล็กทรอนิกส์ที่เลียนแบบดวงตามนุษย์ การใช้กล้องสเตอริโอ หรือเลเซอร์สแกน ซึ่งมีขนาดใหญ่ต้องใช้อัลกอริทึมในการประมวลผล และมักให้ข้อมูลมหาศาล จึงถูกแทนที่ด้วยการใช้กล้อง TOF เพียงตัวเดียว รูปที่ 8

แสดงหุ่นยนต์ที่ใช้เทคโนโลยี PMD เพื่อเลียนแบบดวงตาของมนุษย์ซึ่งพัฒนาโดย Deutschen Zentrums für Luftund Raumfahrt (DLR) เพื่อเลียนแบบดวงตาของมนุษย์กำลังโยนและรับลูกบอล [18]

5. ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับการนำกล้องพีเอ็มดีไปประยุกต์ใช้งาน

5.1 ปัจจัยในการเลือกใช้กล้อง

นอกเหนือจากความสะดวกภาพที่ได้นำเสนอไปแล้วในตารางก่อน ความเร็วภาพยังเป็นอีกปัจจัยที่ควรพิจารณา ตารางที่ 3 แสดงข้อมูลความเร็วภาพ (Frame Rate) สูงสุดของกล้องรุ่นต่างๆ

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบความเร็วภาพของกล้องรุ่นต่างๆ

ชื่อสินค้า	ความเร็วภาพสูงสุด (เฟรม/วินาที)
SwissRanger SR-2 [19]	30
SwissRanger SR-3000 [20]	40
SwissRanger SR-4000 [21]	54
PMD[vision]® CamCube 3.0 [21]	40
PMD[vision]® CamBoard nano [4]	90

ในปัจจุบันพบว่ามีเพียงกล้อง SwissRanger SR-4000 และกล้อง PMD[vision]® CamBoard nano ที่ผลิตและจำหน่าย โดยกล้อง SR-4000 มีราคาประมาณ 4,295 ดอลลาร์สหรัฐ อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้กล้องควรศึกษาปัจจัยทางด้านเทคนิคอื่นๆ ประกอบด้วย

5.2 การปรับปรุงข้อมูลภาพความลึก

เนื่องจากข้อมูลภาพอาจจะมีสัญญาณรบกวน และ อาจมีค่าความผิดพลาดปะปนมาด้วย จึงอาจมีความจำเป็นในการปรับปรุงข้อมูลภาพให้มีความแม่นยำขึ้นก่อนนำไปใช้งาน

May et al. [2] อธิบายความผิดพลาดของกล้องที่โอเอฟเป็นความผิดพลาดที่เกิดจากระบบ (Systematic Errors) และไม่เกิดจากระบบ (Non-systematic Errors) ความผิดพลาดที่เกิดจากระบบมี 3 อย่าง ได้แก่ ความผิดพลาด

ที่เกี่ยวข้องกับระยะทาง ความผิดพลาดที่เกี่ยวข้องกับแอมพลิจูด และสัญญาณรบกวนที่มีเฟสเป็นแพทเทิร์นที่ตายตัว ส่วนความผิดพลาดที่ไม่เกิดจากระบบนั้น มี 3 อย่าง ได้แก่ Signal-to-noise Ratio ที่ไม่ดีทำให้บิดเบือนการวัด ไม่สามารถระบุได้ อย่างที่สอง คือการสะท้อนแบบหลายทาง และสุดท้ายคือการกระจายของแสงที่เกิดในเลนส์ของกล้องที่โอเอฟ ซึ่งความผิดพลาดที่เกิดจากระบบนั้น สามารถจัดการได้ด้วยการสอบเทียบข้อมูลภาพ [22], [23] ในขณะเดียวกัน ก็ได้มีการกรองสัญญาณวิเคราะห์ความผิดพลาดและสอบเทียบข้อมูลภาพด้วยเทคนิคต่างๆ ด้วย [24]-[28]

6. สรุป

จากอดีตจนถึงปัจจุบัน เซนเซอร์และกล้อง PMD ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ภาพความลึกที่ได้จากกล้องเป็นข้อมูลที่ใช้งานได้ทันที ทำให้การนำข้อมูลความลึกไปประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาต่างๆ หรือทดแทนวิธีการเดิมที่มีอยู่นั้น ไม่ซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลภาพจากกล้องซีซีดี กล้องสเตอริโอ หรือระบบสแกนเลเซอร์

ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา ความสะดวกภาพของกล้อง PMD ที่เพิ่มขึ้น และสามารถทำงานในระยะใกล้ๆ ได้ ในขณะที่พยายามลดขนาดของกล้องลง และให้ภาพเร็วพอสำหรับใช้งานในเวลาจริง ทำให้สามารถประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการความรวดเร็วในการตัดสินใจ และใช้พื้นที่จำกัดในการติดตั้งกล้อง เช่น เกมสรีกษาสมดุได้ตอบ หรือการโยนลูกบอล การหลบหลีกลูกปิงปองในขณะเคลื่อนที่ การผสมผสานข้อมูลจากกล้อง PMD กับกล้องชนิดอื่นๆ ให้ข้อมูลที่เพียงพอสำหรับสร้างแผนที่สามมิติ และมีการใช้เพียงกล้อง PMD เพื่อทดแทนเซนเซอร์วัดระยะทางแต่ยังคงพบปัญหาสัญญาณรบกวน จึงได้มีงานวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของข้อมูลให้แม่นยำมากขึ้น ด้วยการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด กำจัดสัญญาณรบกวน และสอบเทียบข้อมูล เพื่อปรับปรุงข้อมูลภาพความลึก

อย่างไรก็ตาม ณ ปัจจุบัน เทคโนโลยี PMD ยังคงอยู่ระหว่างการวิจัยและพัฒนา นักวิจัยรุ่นใหม่จึงควรให้ความสนใจและติดตามพัฒนาการของเซนเซอร์ และ

กล้อง PMD เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาต่างๆ ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Image Sensors World. (2012, June 6). [Online]. Available: <http://image-sensors-world.blogspot.com/2012/06/infineon-cooperates-with-pmd-on.html>
- [2] S. May, D. Droschel, D. Holz, S. Fuchs, E. Malis, A. Nuechter, and J. Hertzberg, "Three-Dimensional Mapping with Time-of-Flight Cameras," *Journal of Field Robotics*, vol. 26(11–12), pp.934–965, 2009.
- [3] H. Roth, R. Schwarte, N. Ruangpayoongsak, J.Kuhle, M.Albrecht, M.Grothof, and H. Heß, "3D Vision Based on PMD-Technology for Mobile Robots," *Aerosense - Technologies and Systems for Defense & Security 2003*, SPIE Conference, Orlando, Florida, pp.5803-66.
- [4] PMD Technologies GmbH. (2012, Dec 27). [Online]. Available: <http://www.pmdtec.com>
- [5] MESA Imaging AG. (2012, Dec 27). [Online]. Available: <http://www.mesa-imaging.ch>
- [6] S. Foix, G. Alenyà, and C. Torras, "Lock-in Time-of-Flight (ToF) Cameras: A Survey," *IEEE Sensors J.*, vol.11, no.3, Mar. 2011.
- [7] D.Jäger, H.-H. Hillbrand, A.Ruckelshausen, and B.Lammen, "3D-Imaging for an Interactive Robot System," *10th International Workshop on Research and Education in Mechatronics*, Glasgow, UK, September 10th-11st 2009.
- [8] P. Gil, J. Pomares, and F. Torres, "Analysis and Adaptation of Integration Time in PMD Camera for Visual Servoing," In *proceeding of 20th International Conference on Pattern Recognition*, ICPR 2010, pp.311–315, Istanbul, Turkey, August 23-26, 2010.
- [9] M. Frank and F. A. Hamprecht, "Image-Based Supervision of a Periodically Working Machine," In *Pattern Analysis and Applications*, Springer 2011.
- [10] A. S.Phung, J.Malzahn, F.Hoffmann, and T. Bertram, "Get Out of the Way-Obstacle Avoidance and Learning by Demonstration for Manipulation," *Proceedings of the 18th IFAC World Congress*, pp.11514-11519, Università Cattolica del Sacro Cuore, Milano, Italy, 2011.
- [11] N. Burrus, M. Abderrahim, J. Garcia, and L. Moreno, "Object Reconstruction and Recognition Leveraging an RGB-D Camera," *The 12th IAPR Conference on Machine Vision Applications*, Nara, japan, June, 2011.
- [12] G. Alenyà, F. Moreno-Noguer, A. Ramisa, and C. Torras, "Active perception of deformable objects using 3D cameras," *2011 Workshop de Robótica Experimental*, pp.434-440, Seville, 2011.
- [13] C. Netramai, M. Oleksandr, C. Joochim, and H. Roth, "Motion estimation of a mobile robot using different types of 3D sensors," In *Proc. 4th International Conference on Autonomic and Autonomous Systems*, pp.148–153, Gosier, Mar. 2008.
- [14] A.Prusak, O.Melnichuk, H.Roth, I.Schiller, and R.Koch, "Pose estimation and map building with a time-of-flight camera for robot navigation," *International Journal on Int. Syst. Technology Applications*, vol.5(3-4), pp.355–364, 2008.
- [15] B. Huhle, M. Magnusson, W. Strasser, and A. J. Lilienthal, "Registration of colored 3D point clouds with a kernel-based extension to the normal distributions transform," In *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1-9, pp.4025–4030, Pasadena, May 2008.



- [16] J. Bernshausen, C. Joochim, and H. Roth, "Mobile Robot Self Localization and 3D Map Building using a 3D PMD-Camera for tele-robotic applications," *18th IFAC World Congress*, pp.6851-6856, Milano, Italy, August 28 September 2, 2011.
- [17] C. Ye and M. Bruch, "A Visual Odometry Method Based on the SwissRanger SR4000," *Unmanned Systems Technology XII, Proc. Of SPIE*, vol.7692, 76921I, 2010.
- [18] B. Bäuml, F. Schmidt, T. Wimböck, O. Birbach, A. Dietrich, M. Fuchs, W. Friedl, U. Frese, C. Borst, M. Grebenstein, O. Eiberger, and G. Hirzinger, "Catching flying balls and preparing coffee: Humanoid Rollin'Justin performs dynamic and sensitive tasks," *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2011*, pp.3443 – 3444, Shanghai, China, May. 9-13, 2011.
- [19] [Online]. Available: [http://www8.cs.umu.se/research/for/dl/Product %20info/SR-2_Data-Sheet.pdf](http://www8.cs.umu.se/research/for/dl/Product%20info/SR-2_Data-Sheet.pdf)
- [20] T. Oggier, B. Büttgen, F. Lustenberger, G. Becker, B. Rüegg, and A. Hodac, "SwissRanger SR3000 and First Experiences based on Miniaturized 3D-TOF Cameras," *ETH 1st RIM Days*, 2005.
- [21] D. Piatti and F. Rinaudo, "SR-4000 and CamCube3.0 Time of Flight (ToF) Cameras: Tests and Comparison," *Remote Sensing*, vol. 4, pp.1069-1089, 2012.
- [22] S. Fuchs and S. May. "Calibration and registration for precise surface reconstruction with ToF cameras," *Proceedings of the Dynamic 3D Imaging Workshop in Conjunction with DAGM (Dyn3D)*, vol.1, 2007.
- [23] S. Fuchs and G. Hirzinger. "Extrinsic and Depth Calibration of ToFcameras," *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2008.
- [24] K. D. Kuhnert and M. Stommel, "Fusion of stereo-camera and PMD-camera data for realtime suited precise 3D environment reconstruction," In *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol.1-12, pp.4780–4785, Beijing, October. 2006.
- [25] M. Frank, M. Plaue, H. Rapp, U. Köthe, B. Jähne, and F.A. Hamprecht, "Theoretical and Experimental Error Analysis of Continous-Wave Time-of-Flight Range Cameras," *Optical Engineering*, vol.48, no. 1 pp.013602-013618, January 2009.
- [26] S. Fuchs and G. Hirzinger, "Extrinsic and Depth Calibration of ToFcameras," *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 08)*, IEEE Press, pp.1-6, June. 2008.
- [27] M. Lindner and A. Kolb, "Calibration of the Intensity-Related Distance Error of the PMD TOF-Camera," *Proc. SPIE XXV Conference on Intelligent Robots and Computer Vision*, pp.6764-6771, September. 2007.
- [28] M. Reynolds, J. Dobo's , L. Peely, T. Weyrich. and G. J Brostow, "Capturing Time-of-Flight Data with Confidence," *2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp.945–952, London, UK, 20-25 June 2011.