

Airborne Laser Scanning (ALS) & UAV Laser Scanning (ULS)



Thirawat Bannakulpiphat & Phisan Santitamnont

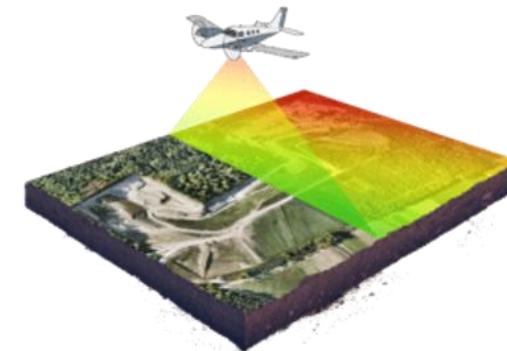
Department of Survey Engineering, Chulalongkorn University

E-mail: thirawat.bannakulpiphat@gmail.com and phisan.chula@gmail.com

February 22, 2023
13.00 – 16.00 PM

1. ไอลดาร์ และการสแกนด้วยแสงเลเซอร์
2. การบินสำรวจไฟล์ด้วยเลเซอร์ และ การสะท้อนกลับของเลเซอร์
3. การกำหนดตำแหน่งบนโลกด้วยวิธีต่าง, ความคลาดเคลื่อนของการสแกนด้วยแสงเลเซอร์ และ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการปรับแก้
4. ผลผลิตเลเซอร์สแกนเนอร์ และการแสดงผลข้อมูลพอยต์คลาวด์
5. การประยุกต์ใช้งาน Laser Scanning
6. ซอฟต์แวร์ที่สเปิดสำหรับตรวจสอบคุณภาพเป้าควบคุมก่อนประเมินผล

ไลดาร์ และ การสแกนด้วยแสงเลเซอร์



การสแกนด้วยแสงเลเซอร์เป็นเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลชนิดที่สามารถสร้างแหล่งพลังงานได้ด้วยตัวเอง (Active Remote Sensing) โดย พลังงานที่สร้างขึ้นจะอยู่ในรูปของแสงเลเซอร์ ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการวัดระยะทางระหว่างอุปกรณ์รังวัดไปยังพื้นผิวของวัตถุ โดยมักจะเรียกเทคนิค การสำรวจนี้ว่า ไลดาร์ (Light Detection And Ranging : LiDAR)

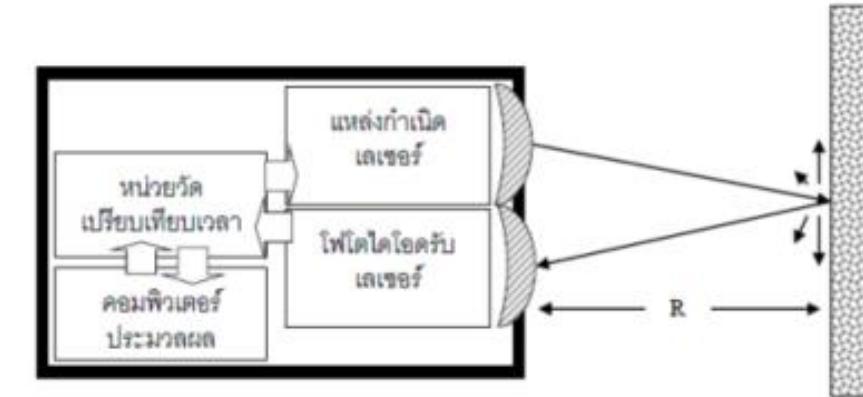
หลักการทำงานของระบบเลเซอร์สแกนเนอร์จะมีเครื่องวัดระยะทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นองค์ประกอบสำคัญ โดยเครื่องวัดระยะทางจะจับเวลาในการเดินทางของแสงเลเซอร์ด้วยหน่วยวัดเปรียบเทียบกับเวลา เมื่อแสงเลเซอร์เดินทางไปตกลงบนพื้นผิวของวัตถุ และสะท้อนกลับมายังเครื่องรับ จะมีการเปรียบเทียบเวลาตั้งแต่ออกไปจนถึงกลับเข้ามาและเมื่อทราบเวลาที่แสงเลเซอร์ใช้เดินทางแล้วนำไปคูณเข้ากับความเร็วของแสง จะสามารถคำนวณระยะทางออกมาได้ แต่ระยะทางดังกล่าวจะเป็นระยะทาง 2 เท่า คือ ระยะทางของแสงที่เดินทางไปตกลงบนพื้นผิวและระยะทางที่แสงสะท้อนทางกลับมายังเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์

$$R = \frac{v \cdot t}{2}$$

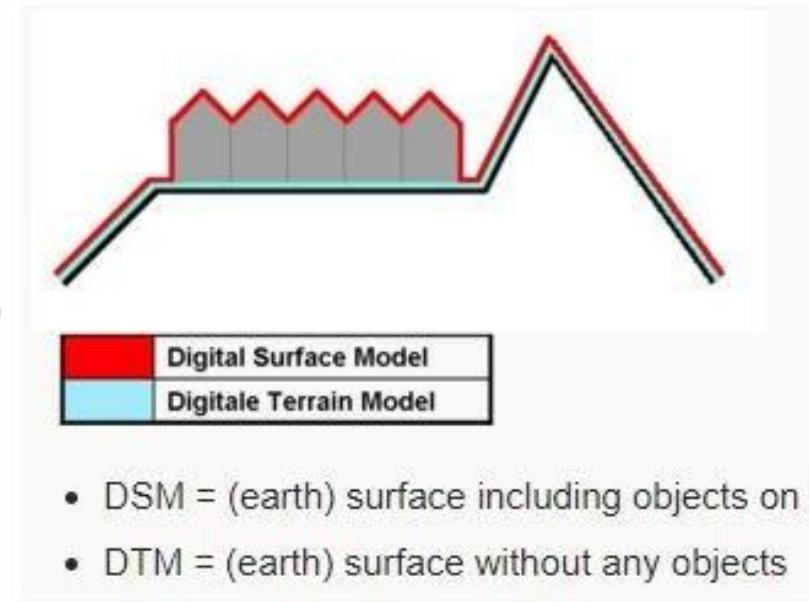
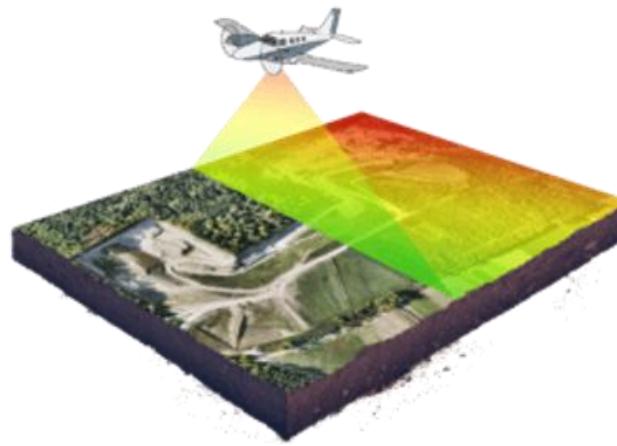
โดยที่ R คือ ระยะทางจากเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ไปยังวัตถุ

V คือ ความเร็วการแพรคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (แสงเลเซอร์)

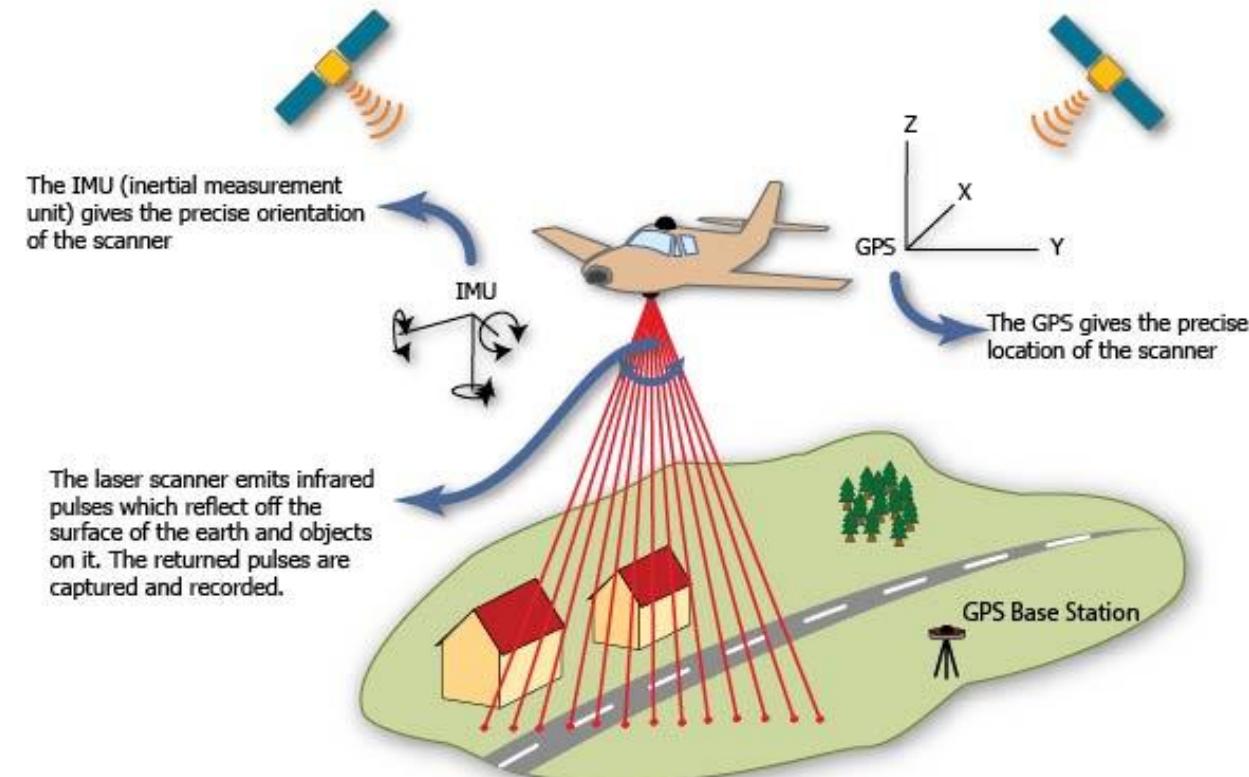
t คือ ระยะเวลาที่แสงเลเซอร์ใช้ในการเดินทาง



การสแกนด้วยแสงเลเซอร์ทางอากาศ หรือการสำรวจด้วยไลเดาร์ทางอากาศมีวัตถุประสงค์หลักคือการได้มาซึ่งแบบจำลองระดับ (Digital Elevation Model : DEM) โดยต้องการให้พื้นที่ที่ทำการสำรวจมีจุดระดับอย่างละเอียดหนาแน่นมากกว่า 1 จุดต่อตารางเมตร ซึ่งจะทำให้ความสูงที่ได้มีความละเอียดถูกต้องน่าเชื่อถือในระดับเดซิเมตร อีกทั้งค่าระดับที่ได้จะเป็นระดับของแบบจำลองพื้นผิว (Digital Surface Model : DSM) กล่าวคือ แบบจำลองที่แสดงถึงระดับความสูงของพื้นผิวที่ประกอบด้วยภูมิประเทศ ซึ่งจะปรากฏทั้งอาคารสิ่งปลูกสร้าง พืชพรรณ และวัตถุอื่นๆ ที่อยู่ในพื้นที่นั้น ๆ ของแบบจำลอง

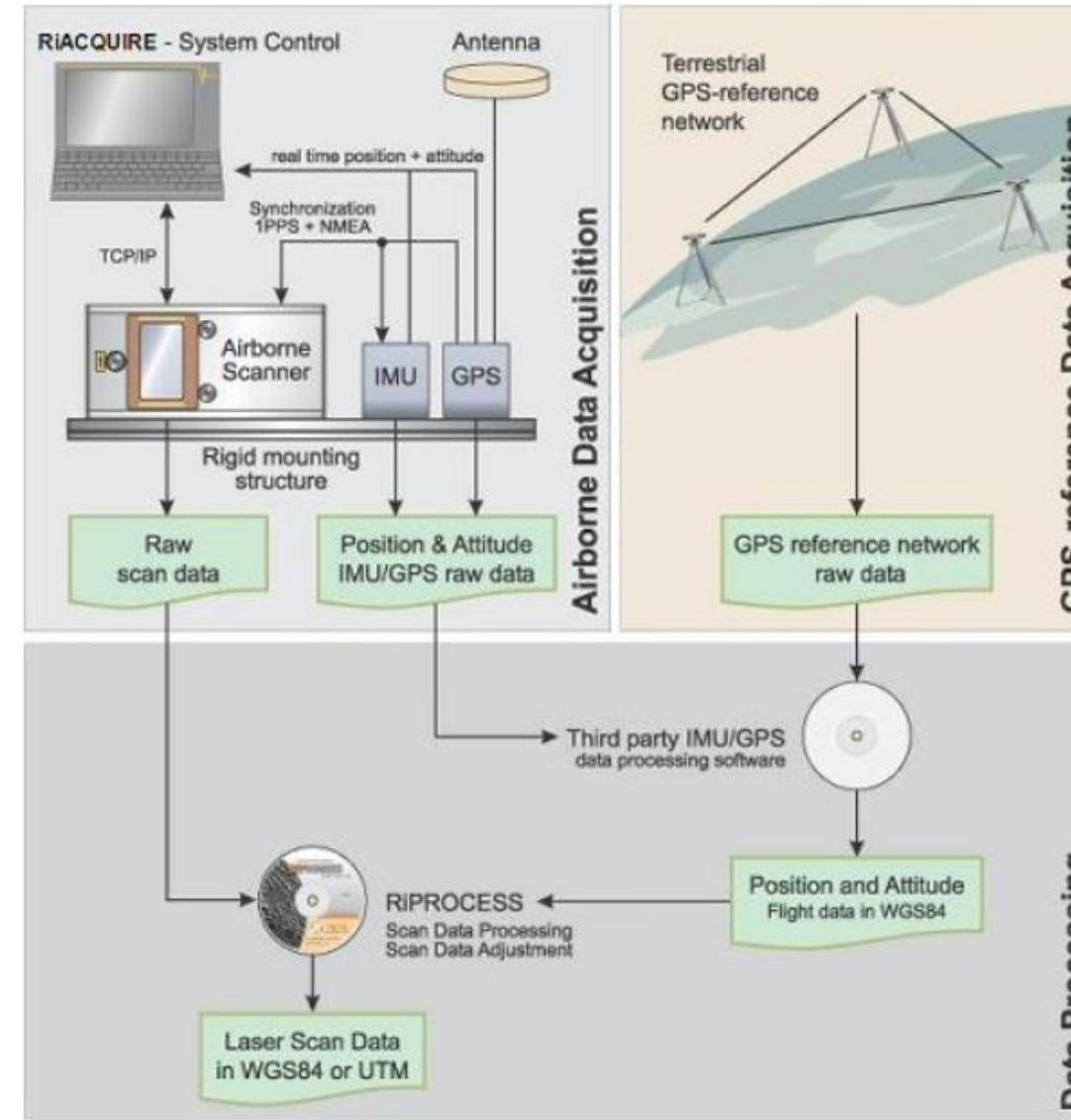


เทคโนโลยีการสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ จะทำการวัดระยะทางด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ที่มีช่วงคลื่นเลเซอร์ที่มีความถี่ที่สูง (high pulse repetition rate : PRF) โดยการวัดระยะทางอย่างต่อเนื่องออกไปในแนวตั้งจากกับแนวบินพร้อมกับการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของอากาศยาน ระยะทางที่ได้จะสามารถนำไปคำนวณให้เป็นค่าพิกัดสามมิติจำนวนมากของจุดบนพื้นผิวต่ำหรือภูมิประเทศ ซึ่งจะเรียกว่าข้อมูลพอยต์คลาวด์ โดยในการรังวัดด้วยเทคโนโลยีเลเซอร์โดยตรงจากอากาศยาน จะทำให้ค่าระดับที่ได้มีความละเอียดถูกต้องในช่วง 10 – 30 เซนติเมตร เนื่องจากความละเอียดถูกต้องของการรังวัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์ ประกอบกับตำแหน่งของอากาศยานที่สามารถตรวจจับด้วยความละเอียดถูกต้องสูงด้วยการกำหนดตำแหน่งบนโลกด้วยวิธีตรัง (DG) โดยอาศัยการบูรณาการร่วมกันของจีเอ็นอสเอสและไอเอ็มยู (GNSS/MU) ซึ่งจะทำให้ได้วิถีการเคลื่อนที่ของอากาศยานในรูปแบบตำแหน่ง ความเร็ว และการเอียงตัว ของอากาศยานและเซนเซอร์

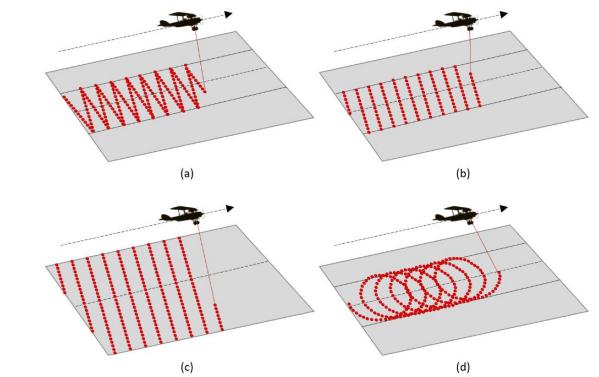


ระบบที่เกี่ยวข้องกับการสแกนด้วยแสงเลเซอร์ทางอากาศ ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่

1. **ส่วนบันทึกข้อมูล (Data acquisition)** เป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ควบคุม โดยมีการควบคุมจังหวะการปล่อยลำแสงและบันทึกการอ้างอิงตำแหน่งและการอ้างอิงตัวของระบบ GNSS/IMU ดังนั้นข้อมูลที่บันทึกจะมาจากการวัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์ซึ่งจะต้องมีค่ามุ่งความดของลำแสงเทียบกับระบบเลเซอร์ และอีกส่วนหนึ่งคือข้อมูลสัญญาณ GNSS/IMU เพื่อนำมาใช้ในการประมวลผลในภายหลังร่วมกับข้อมูลสัญญาณดาวเทียมบนพื้นดิน
2. **ส่วนสนับสนุนการอ้างอิงตำแหน่งพิกัดโดยตรง (GNSS reference data acquisition)** เพื่อให้การกำหนดตำแหน่งมีความละเอียดถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ ในระหว่างการบันทึกเลเซอร์จะมีการตั้งเครื่องรับสัญญาณ GNSS บนพื้นดิน พร้อมกับอากาศยานที่ทำการบิน ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลมาประมวลผลภายหลังร่วมกับข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจากอากาศยาน
3. **ส่วนประมวลผล (Data processing)** เป็นการประมวลผลข้อมูลและสัญญาณต่าง ๆ ที่บันทึกได้จากห้องอากาศยานและบนภาคพื้นดิน ในส่วนของการอ้างอิงตำแหน่งพิกัดโดยตรงจะประมวลผลในรูปแบบ Phase differential และคำนึงถึงความต่อเนื่องของการรับสัญญาณที่เสารับสัญญาณเคลื่อนที่ไปพร้อมกับอากาศยาน โดยเรียกวิธีการนี้เรียกว่า Post-processed Kinematic Differential

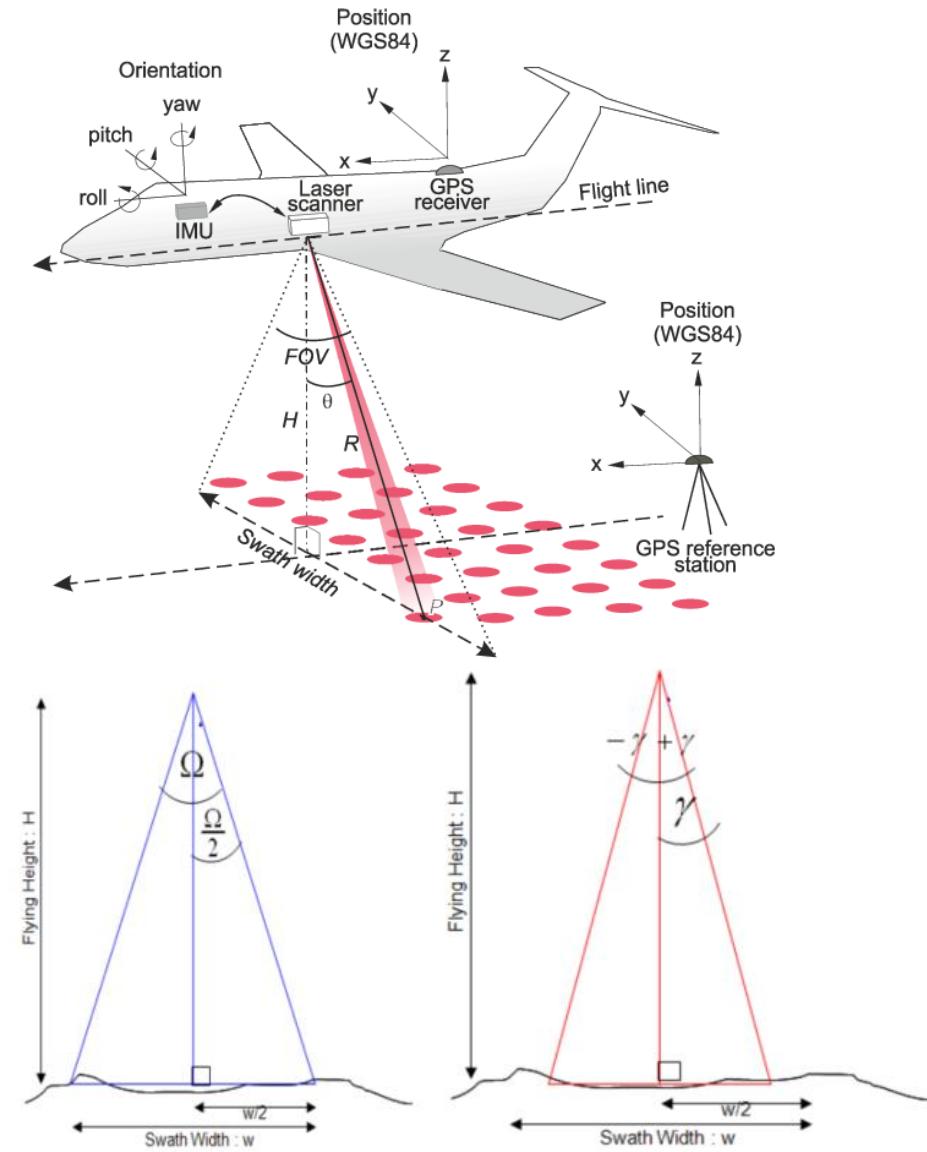


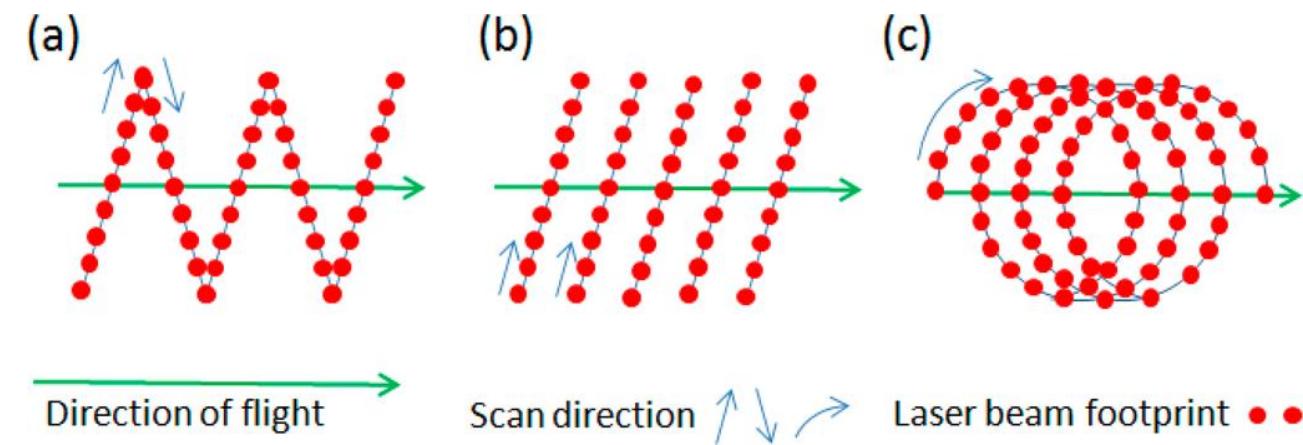
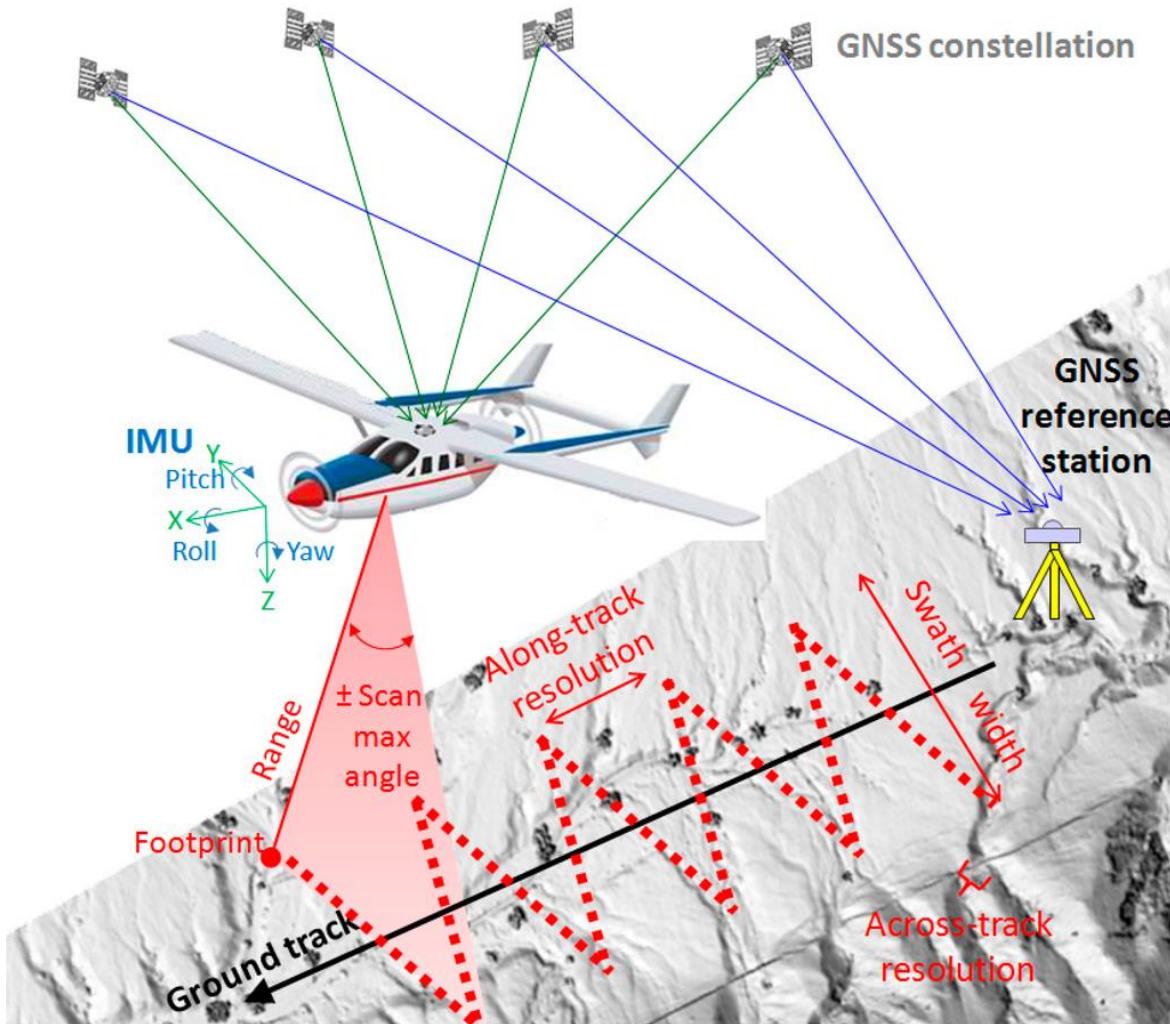
การบินสำรวจโปรไฟล์ด้วยเลเซอร์ และ การสะท้อนกลับของเลเซอร์



เมื่ออากาศยานมีการติดตั้งเครื่องวัดระยsegmentsและเซนเซอร์อื่น ๆ เรียบร้อยแล้ว เมื่ออากาศยานเคลื่อนที่ไปข้างหน้า การกวาดของแสงจะเกิดขึ้นตลอดเวลา จึงทำให้ได้ข้อมูลเป็นพื้นที่ครอบคลุมพื้นที่ที่ศึกษา หากพื้นที่มีขนาดที่กว้างต้องมีการบินในหลาย ๆ แนวบิน ซึ่งในการกวาดแสงเลเซอร์สำหรับบันทึกข้อมูลจะมีการกวาดที่แตกต่างกันไปตามคุณลักษณะของฮาร์ดแวร์ที่เลือกใช้ โดยรูปแบบของการกวาดไม่ได้มีบทบาทมากสำหรับผู้นำไปประยุกต์ สิ่งที่ผู้ใช้งานใจ คือ ความหนาแน่นของจุดเลเซอร์ที่สามารถนำไปใช้งานต่อได้

พื้นที่การกวาด (Swath width) มีผลต่อความหนาแน่นจุดเลเซอร์ที่จะบันทึกได้โดยจะมีการคำนวณจากพารามิเตอร์ Scanning angle (γ) ซึ่งถ้าเป็นมุมเปิดรับภาพกรณีกล้องถ่ายภาพทางอากาศมักจะกำหนดเป็น Field-Of-View (FOV) หรือสัญลักษณ์ Ω จะเห็นว่า Scanning angle จะเป็นครึ่งหนึ่งของ FOV

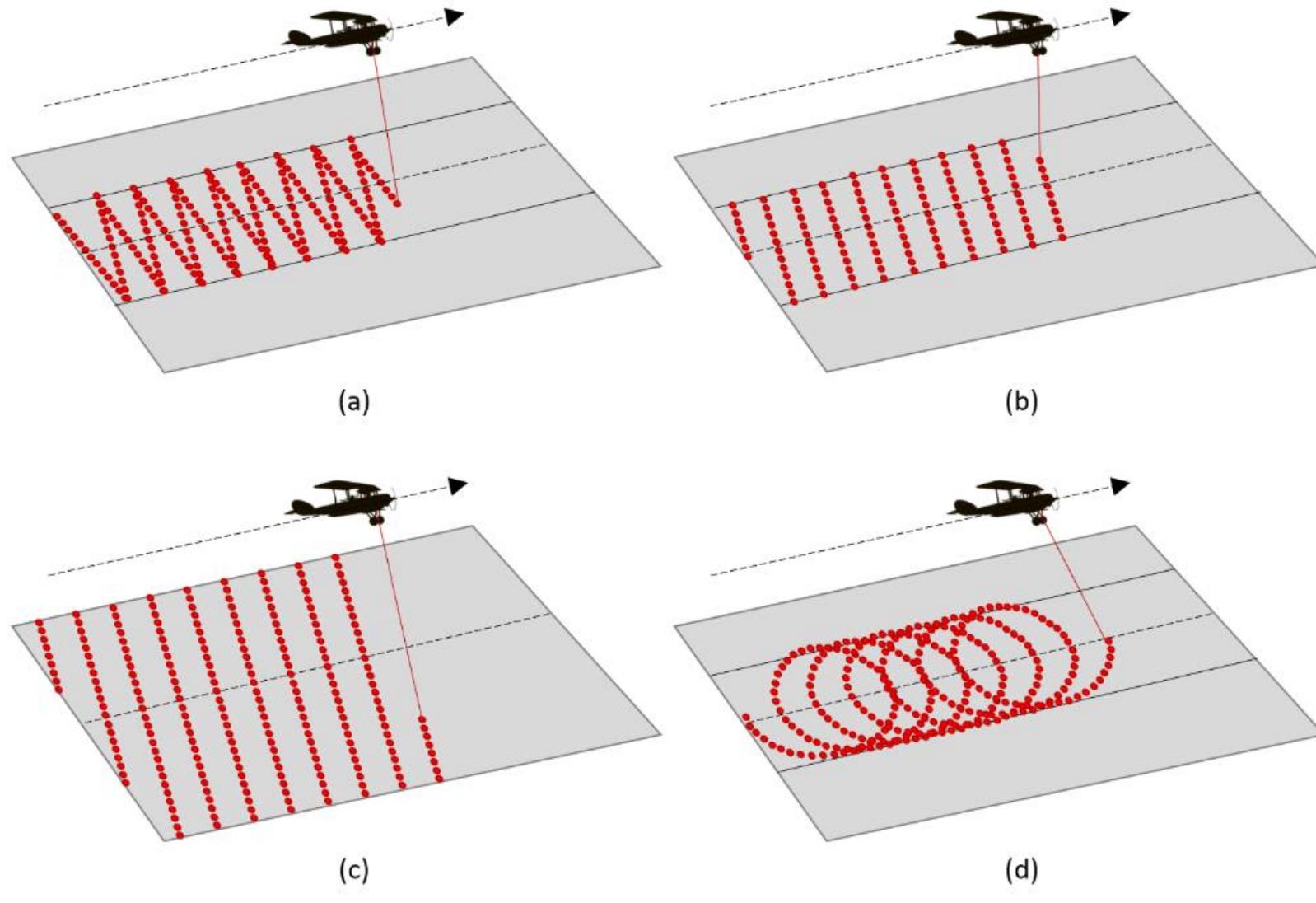
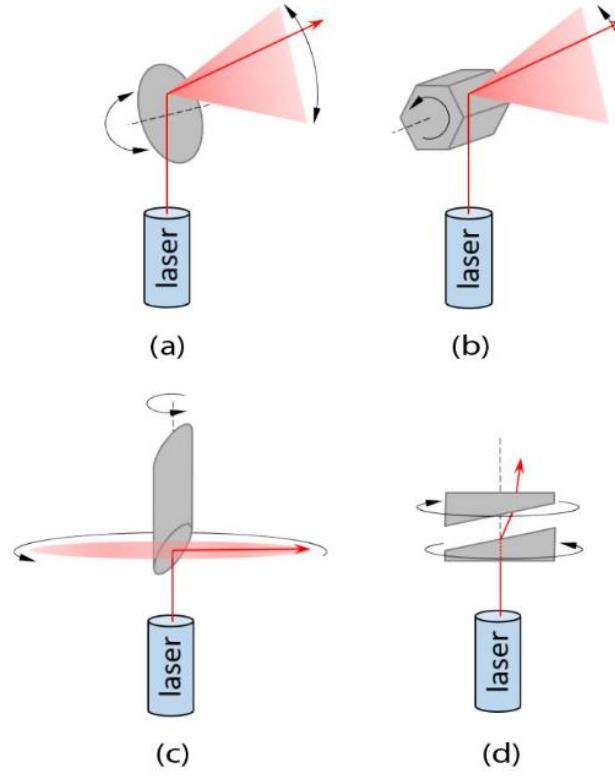




Single swath ground track patterns of different scanning mechanisms (a) oscillating mirror; (b) rotating polygon; (c) Palmer scanner.

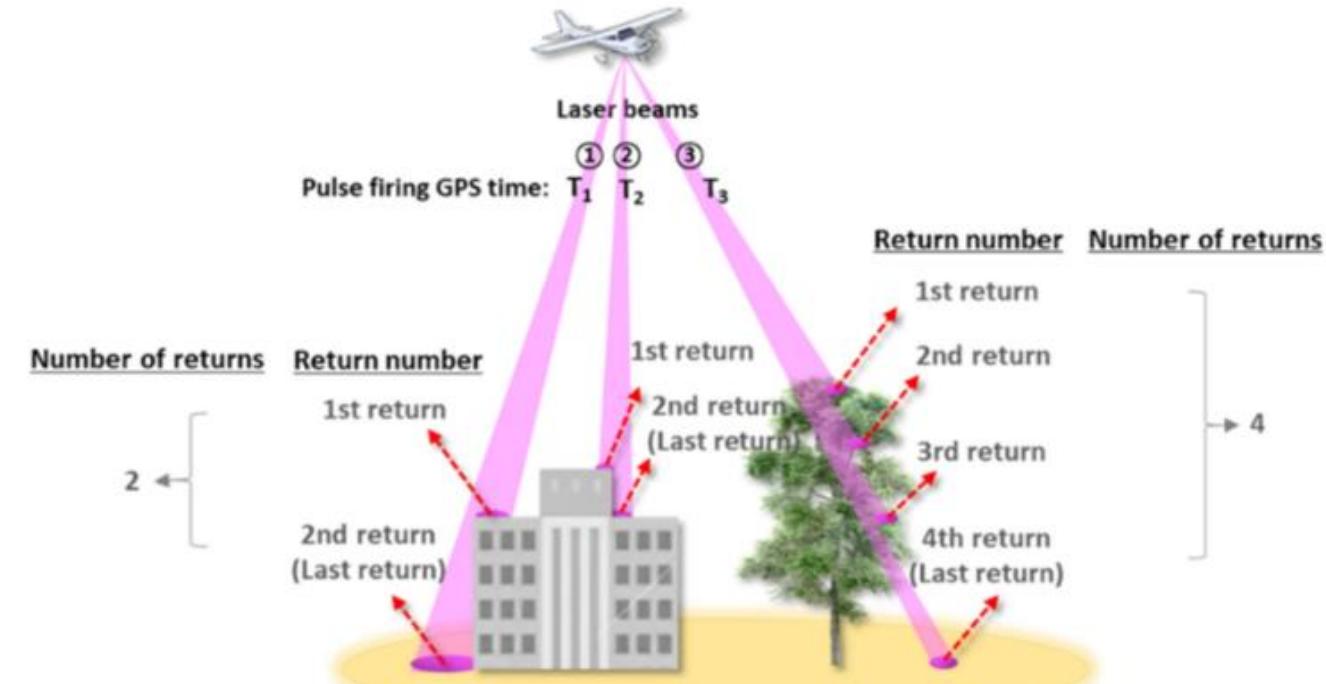
Different scan patterns

- (a) an oscillating mirror
- (b) a rotating polygonal mirror
- (c) a rotating mirror
- (d) a rotating wedge prism

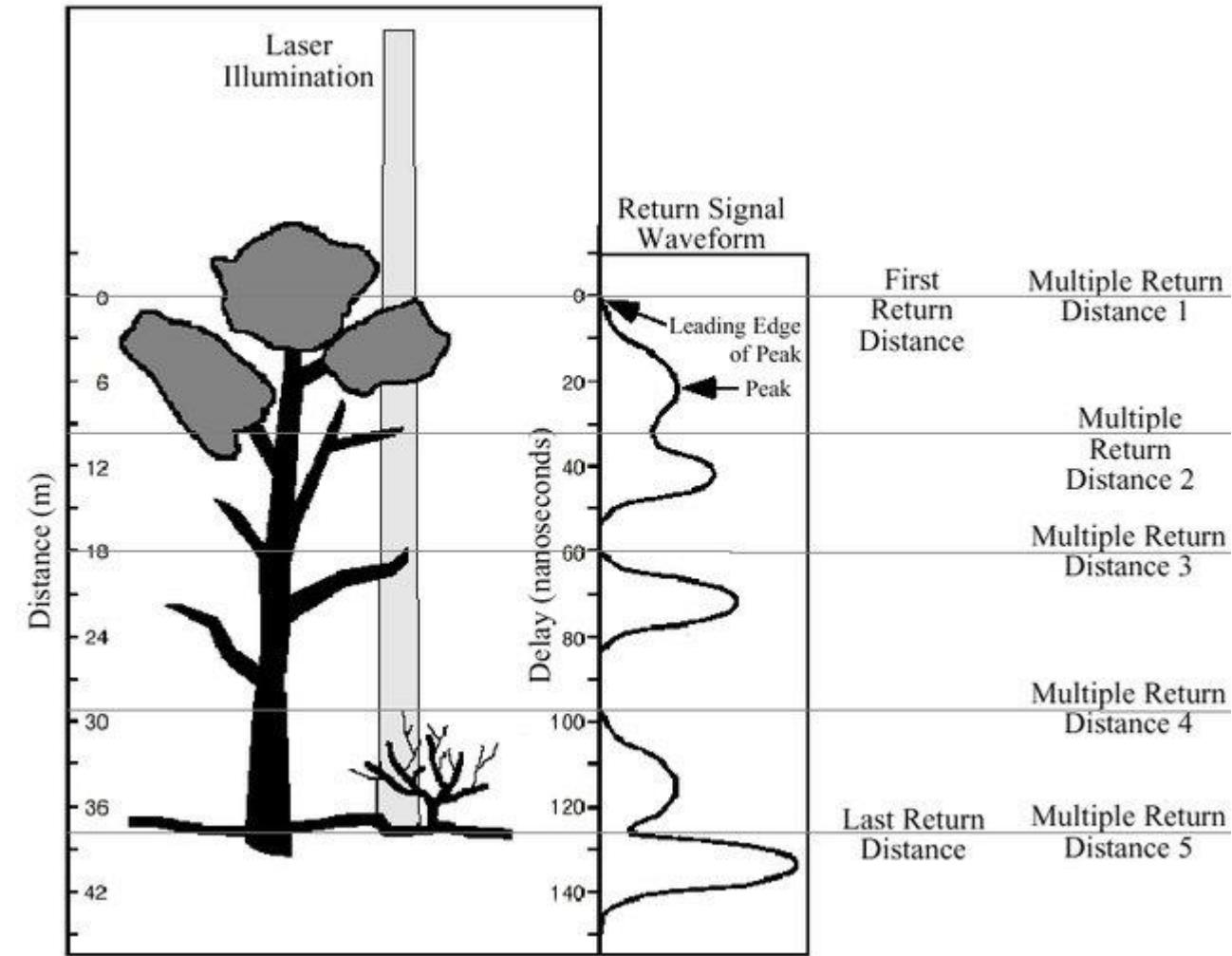


การสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ อุปกรณ์เลเซอร์สแกนเนอร์จะปล่อยเลเซอร์ให้ไปต่กระยะบินพื้นผิวของวัตถุและสะท้อนกลับ แต่เนื่องจากวัตถุที่อยู่บนผิวโลก มีความหลากหลายและยังมีความสามารถในการสะท้อนที่แตกต่างกัน ทำให้เลเซอร์ที่สะท้อนกลับไปยังอุปกรณ์เลเซอร์สแกนเนอร์มีการบันทึกสัญญาณในหลายลูกคิลีน

โดยกรณีที่คลีนของเลเซอร์เดินทางผ่านพื้นผิวไม่ทึบคุณภาพรังสี หากพื้นผิวไม่หนาแน่นมาก คลีนบางส่วนอาจต่ำกระยะบินยอดไม้ บางส่วนอาจต่ำกระยะที่กั้นสาขาของต้นไม้และส่วนอื่น ๆ ในทรงพุ่ม (canopy) และลูกคิลีนของเลเซอร์นั้นอาจเดินทางต่อไปต่ำกระยะบินพื้นดิน หากระบบมีความสามารถในการสะท้อนกลับของลูกคิลีนเหล่านี้ โดยการสังเกตเวลาที่ลูกคิลีนเดินทางไปแล้วกลับ จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับในหลายลูกคิลีน โดยข้อมูลเหล่านี้จะถูกบันทึกไว้ในข้อมูลจำเพาะของพอยต์คลาวด์แต่ละจุด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการจำแนกสิ่งที่ปกคลุมบนพื้นผิวภูมิประเทศเป็นอย่างมาก โดยการบันทึกการสะท้อนกลับของลูกคิลีนนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจำแนกประเภทของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่เป็นจุดบนพื้นดิน ออกจากจุดที่ได้ต่ำกระยะบินพื้นดินได้อย่างง่ายดาย



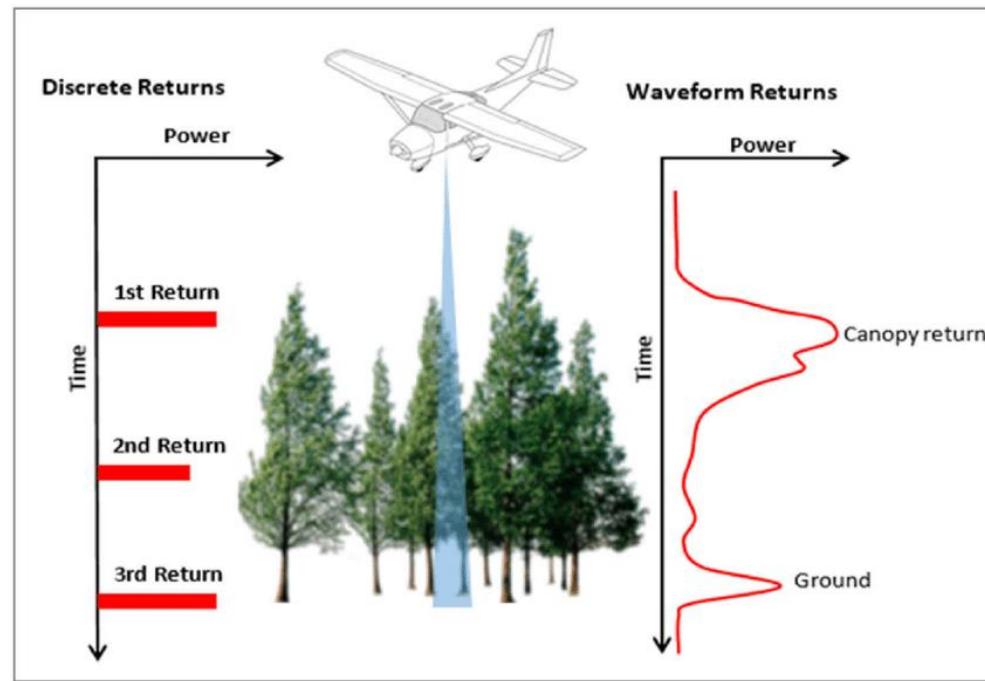
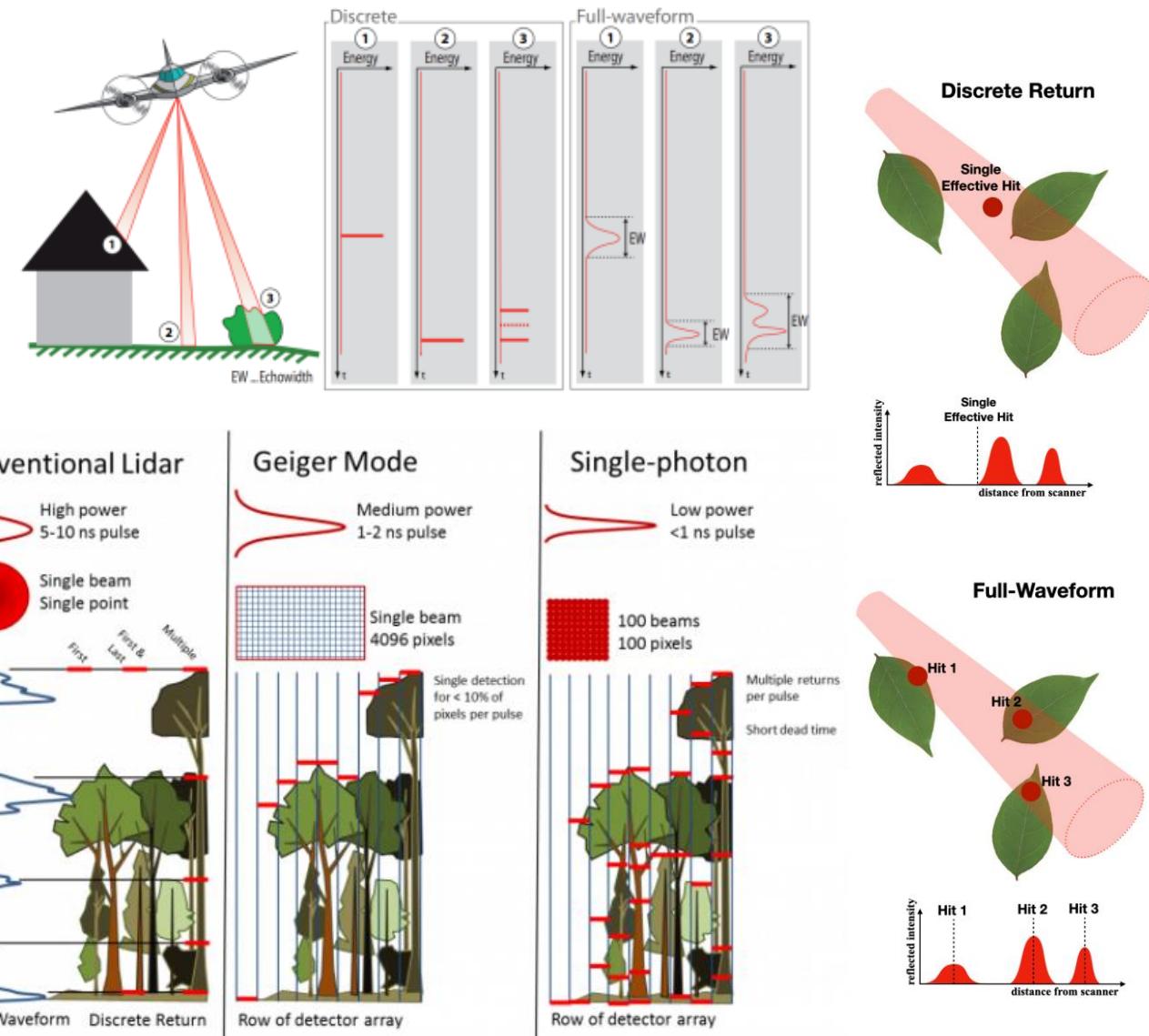
ด้วยข้อเท็จจริงของพฤติกรรมการสะท้อนของเลเซอร์ทำให้นำไปสู่การจำแนกจุดบนพื้นดิน (Ground) ออกจากจุดที่ไม่ใช่จุดที่ตกลงบนพื้นดินได้ง่ายและอัตโนมัติ โดยทั่วไปจะพบว่าจำนวนจุดบนพื้นดินจะมีจำนวนน้อยกว่าจุดที่ยังไม่ได้จำแนกเป็นสัดส่วน 2 – 5 เท่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการปักคลุมของพืชพรรณ โดยหากระบบสามารถบันทึกลูกคืนที่เกิดจากการสะท้อนกลับได้เป็นจำนวนมาก ข้อมูลการสะท้อนกลับหลายครั้ง (Multiple returns) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กว้างขวางขึ้นไปอีก เช่น การหาปริมาตรของป่าไม้ การวิเคราะห์ชนิดและคุณภาพของชีวมวล (Biomass) เป็นต้น ดังนั้นผู้ผลิตจึงได้มีการพัฒนาความสามารถในการบันทึกลูกคืนที่สะท้อนกลับหลายครั้งเพื่อให้ผู้ใช้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ภายหลัง โดยเรียกระบบนี้ว่า “Full-Waveform Digitizer”



Discrete vs. Full Waveform Lidar

A waveform or distribution of light energy is what returns to the lidar sensor. This return may be recorded in two different ways:

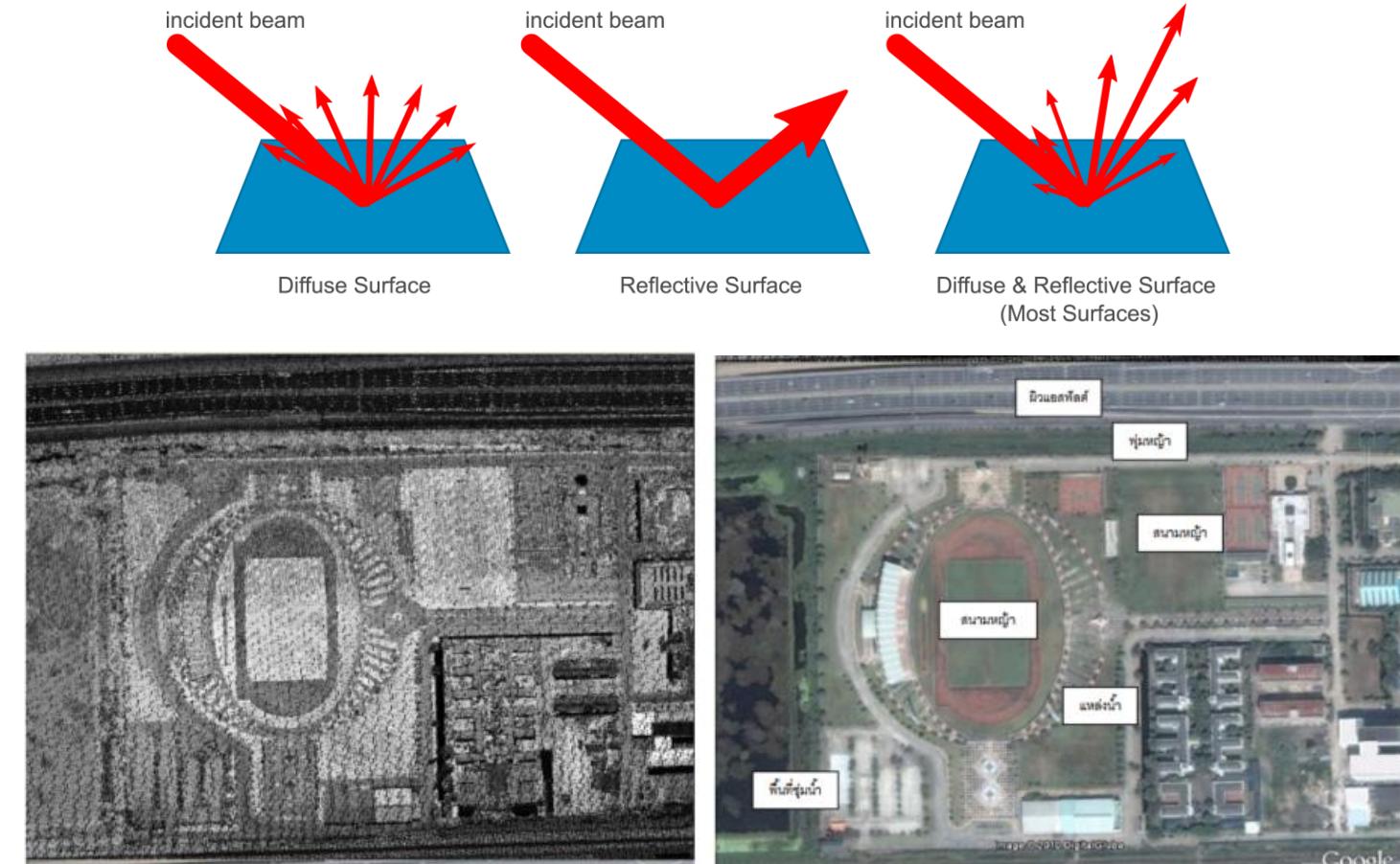
1. A **discrete return lidar system** identifies individual (discrete) peaks and records a point at each peak location in the waveform curve. These discrete or individual points are called returns. A discrete system may record 1-4 (and sometimes more) returns from each laser pulse.
2. A **full waveform lidar system** records a distribution of returned light energy. Full waveform lidar data are thus more complex to process, however, they can often capture more information compared to discrete return lidar systems.



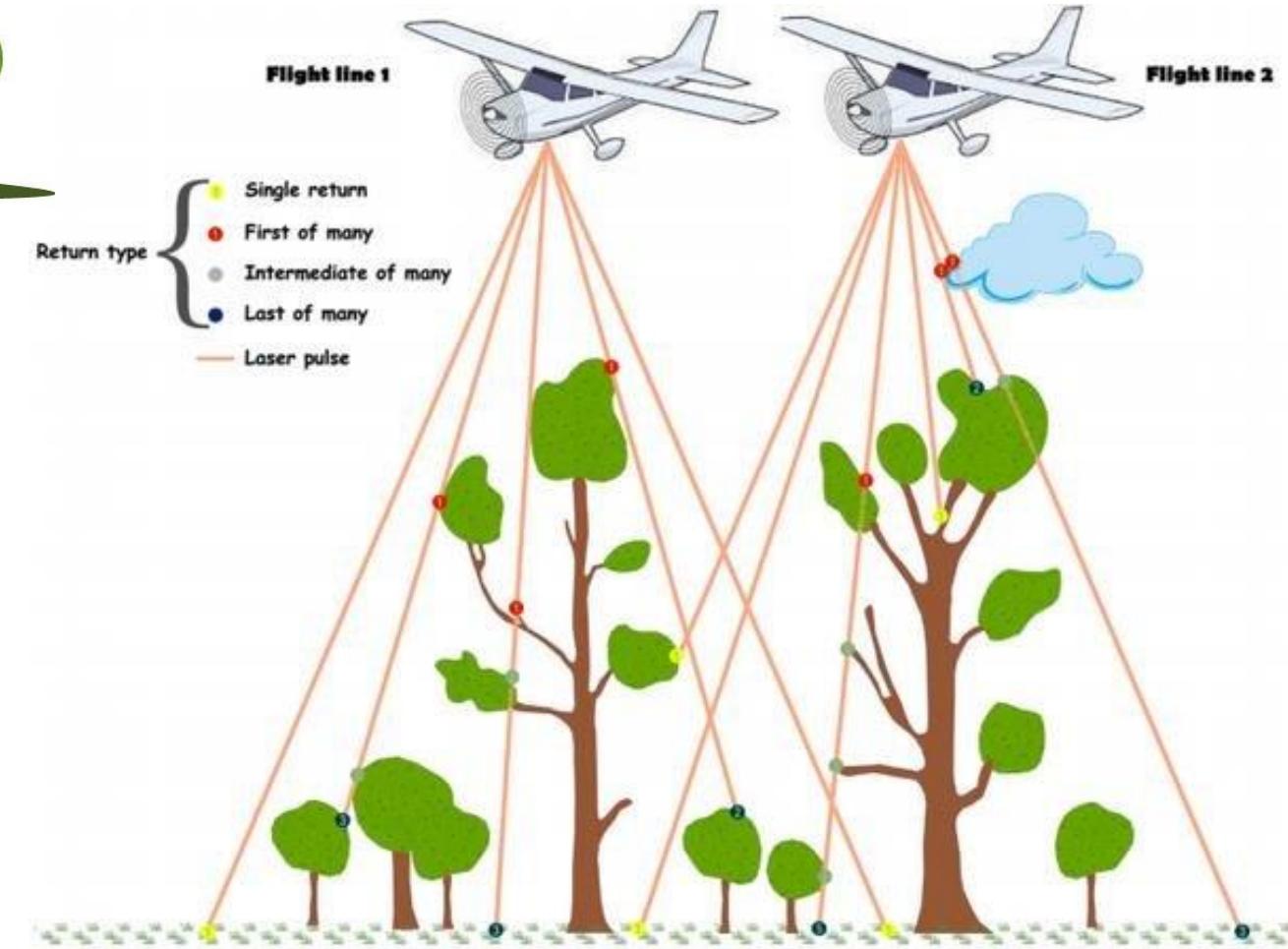
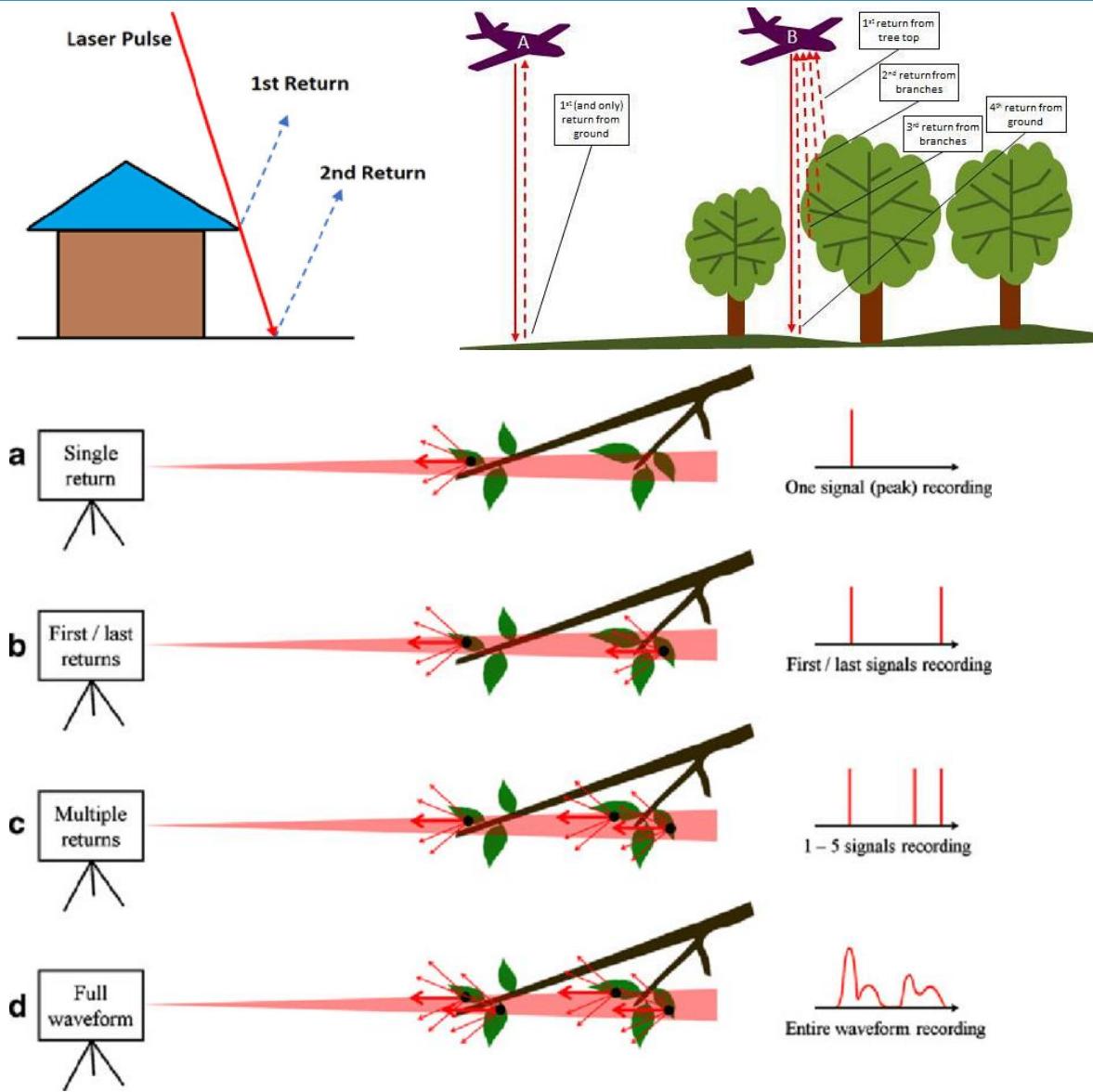
เมื่อแสงเลเซอร์กระทบกับวัตถุที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน การสะท้อนกลับของเลเซอร์จะแตกต่างกันไป โดยจะให้ในรูปของสัดส่วนความแรงสัญญาณที่สะท้อนกลับ (Reflectivity) เทียบกับวัตถุที่สะท้อนได้ดีเป็น 100 %

Typical Reflectivity of Various Reflecting Materials at a Wavelength of 900 nm

Material	Reflectivity (%)
Lumber (pine, clean, dry)	94
Snow	80–90
White masonry	85
Limestone, clay	Up to 75
Deciduous trees	Typ. 60
Coniferous trees	Typ. 30
Carbonate sand (dry)	57
Carbonate sand (wet)	41
Beach sand; bare areas in desert	Typ. 50
Rough wood pallet (clean)	25
Concrete, smooth	24
Asphalt with pebbles	17
Lava	8
Black neoprene (synthetic rubber)	5



ความสามารถในการสะท้อนกลับของเลเซอร์ บน: ภาพ Intensity, ล่าง: ภาพถ่ายดาวเทียม ในช่วงเวลาเดียวกัน

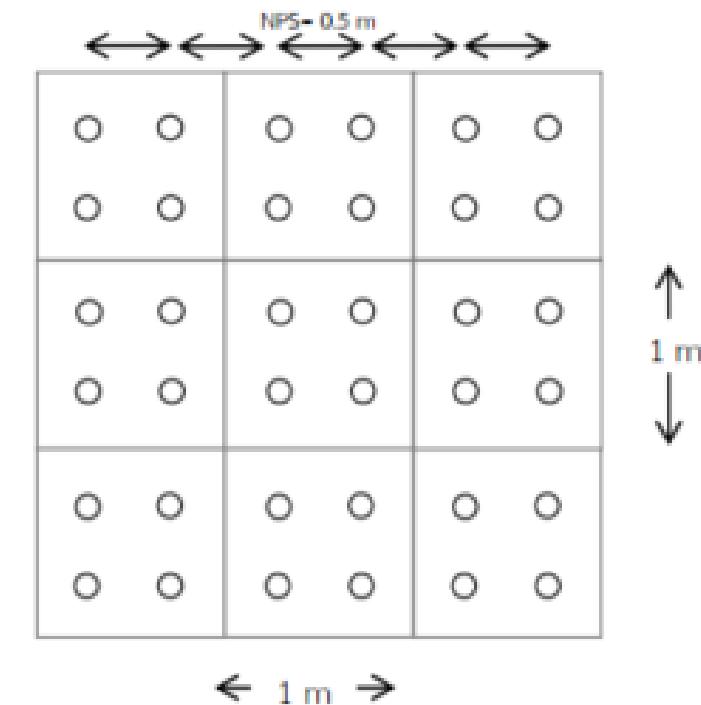


ความหนาแน่นของจุดเลเซอร์ที่ตกลงพื้นผิวภูมิประเทศ เรียกว่า Point Density (PD) ความหนาแน่นของจุดเลเซอร์มากหรือน้อยย่อมขึ้นอยู่กับความสามารถของระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ติดตั้งบนอากาศยาน พารามิเตอร์ที่กำหนดให้ระบบทำงาน ได้แก่ Pulse Repetition Rate (PRF), มุมกว้างแลบกว้าง และรูปแบบการกว้าง อันเนื่องมาจากผลการออกแบบเครื่องมือ นอกจากนั้นความลาดเอียง ความสูงต่ำและสิ่งปகคคลุมภูมิประเทศ ยังมีผลต่อการสะท้อน และมีเรขาคณิตที่มีผลต่อรูปแบบการสแกนที่ปรากฏอีกด้วย

การระบุความหนาแน่นของจุดเลเซอร์ยังสามารถระบุด้วยระยะห่างระหว่างจุดเลเซอร์ที่ปลดปล่อยมา (Pulse Spacing) ซึ่งตามมาตรฐานสากลกำหนดให้ใช้ ระยะห่างระหว่างจุดเลเซอร์ปล่อยปกติ (Nominal Pulse Spacing : NPS)

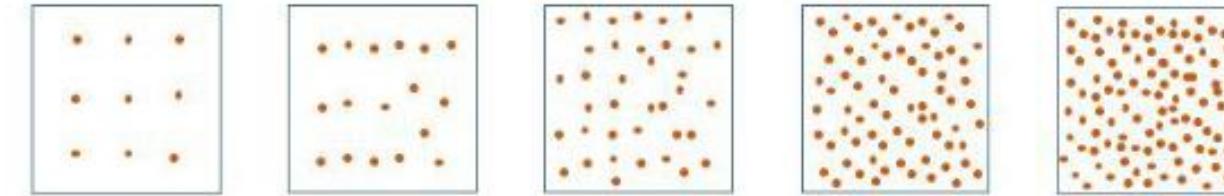
$$NPS = \frac{1}{\sqrt{PD}}$$

ในกรณีที่จุดเลเซอร์กระจายอย่างสม่ำเสมอ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของจุดเลเซอร์และระยะห่างระหว่างจุดสามารถหาได้โดยง่าย ดังตัวอย่าง หากความหนาแน่นของจุดเลเซอร์เป็น 4 จุดต่อตารางเมตร ระยะห่างระหว่างจุดเลเซอร์จะเป็น 0.5 เมตร เป็นต้น



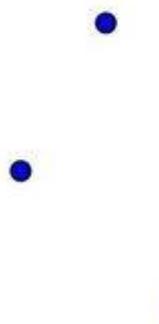
ความหนาแน่นของจุดเลเซอร์นี้จะนับเฉพาะจำนวนลูกคลื่นที่ปลดปล่อยออกจากระบบและบันทึกได้ เช่น การนับเฉพาะลูกคลื่นที่สะท้อนกลับลูกแรก (first-return) ดังนั้น ระยะห่างระหว่างจุดเลเซอร์ที่เป็นการนับรวมจำนวนลูกคลื่นเลเซอร์แต่ละลูกคลื่นที่ส่องออกไปแล้วจะสะท้อนกลับหลายครั้งและนับรวมได้ทั้งหมด จึงเป็นคำนิยามที่ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับไลเดาร์ที่มีการบันทึกข้อมูลสะสมท่อนกลับของเลเซอร์แบบหลายครั้ง (Multiple-returns)

ในทางปฏิบัติการกระจายของจุดเลเซอร์อาจไม่เสมอตามอุดมคติ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการกวาดของเลเซอร์ มุมกว้างแบบกว้าง รูปแบบการกวาด เป็นต้น ดังนั้นจึงได้มีผู้พยายามหาวิธีการประเมินความหนาแน่นของจุดเลเซอร์และระยะห่างของจุดเลเซอร์ที่อาจจะมีรูปแบบไม่เสมอ โดยมุ่งหวังให้ผลการคำนวณ ไม่มีความเอนเอียง มีความน่าเชื่อถือและเมื่อทำการคำนวณซ้ำยังให้ผลเช่นเดิม โดยวิธีการหนึ่งที่ได้รับความนิยมในการคำนวณระยะห่างระหว่างจุดเลเซอร์ (NPS) จะทำการสร้างข่ายรูปสามเหลี่ยมที่มีรูปร่างที่ดี โดยจุดยอดทั้งสามของสามเหลี่ยม คือ จุดเลเซอร์ที่พิจารณารูปสามเหลี่ยมจะเป็นไปตามทฤษฎี Delaunay Triangulation

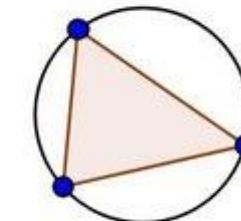


Point Density	0.5-1 pts/m ²	1-2 pts/m ²	2-5 pts/m ²	5-10 pts/m ²	10+ pts/m ²
Application	<ul style="list-style-type: none"> Basic Surface Model Forest Inventory 	<ul style="list-style-type: none"> Flood Modelling Dam and Water Inundation Calculations 	<ul style="list-style-type: none"> Multi-purpose data sets 	<ul style="list-style-type: none"> Basic 3D models 	<ul style="list-style-type: none"> Detailed 3D city models

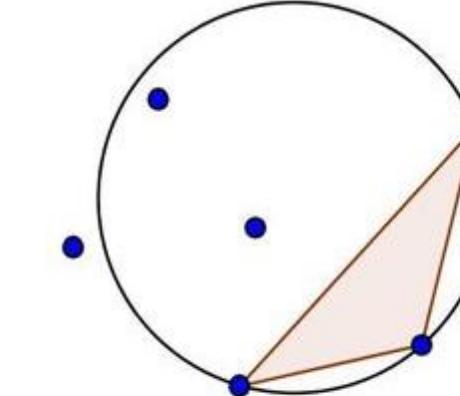
ທຖ່ງກົງວ່າດ້ວຍການສ້າງຮູບສາມເຫີຍມສໍາຮັບກລຸ່ມຂອງຈຸດສຸມໄດ້ ຈະທຶນເຫີຍມແຕ່ລະຮູປທີ່ສ້າງໄດ້ຈະມີວົງກລມທີ່ລ້ອມຮອບຕົວເອງ ໂດຍທີ່ຈະໄມ້
ຮອບຄລຸ່ມຈຸດສຸມນອກເໜືອ ພລທີ່ໄດ້ຄື່ອສາມເຫີຍມສ່ວນມາກຈະໄມ້ມີມູນໃດມູນທີ່ເລີກມາກຕ່າງຈາກມູນຍອດທີ່ເຫີຍມາກ ຈະຮູບສາມເຫີຍມນີ້ຈະສື່ວ່າຈຸດສາມ
ຈຸດໄດ້ ບນກຸມປະເທດມີຄວາມຕ່ອນເນັ້ນໃນດ້ານການເປີຍນແປງຄວາມສູງ ດັ່ງນັ້ນອັລກິລິທີມໃນກາຣຄໍານວນຮະຍະທ່າງຮ່ວ່າງຈຸດຈະທຳການສ້າງ
Delaunay Triangulation ໄປນກລຸ່ມຈຸດເລເຊອຮ໌ທີ່ພິຈາຮານາ ແລ້ວຄໍານວນຮະຍະທ່າງຮ່ວ່າງຈຸດເລເຊອຮ໌ທັງໝາດທີ່ໄດ້ຈາກດ້ານຕ່າງ ຈະຂອງຮູບສາມເຫີຍມ
ຈາກນັ້ນນໍາຮະຍະທ່າງຮ່ວ່າງຈຸດເລເຊອຮ໌ໄດ້ ຈຶ່ງໃນທີ່ນີ້ຄື່ອຄວາມຍາວຂອງດ້ານຂອງຮູບສາມເຫີຍມແຕ່ລະຮູປ ພິຈາຮານາພ້ອມກັນທັງໝາດ



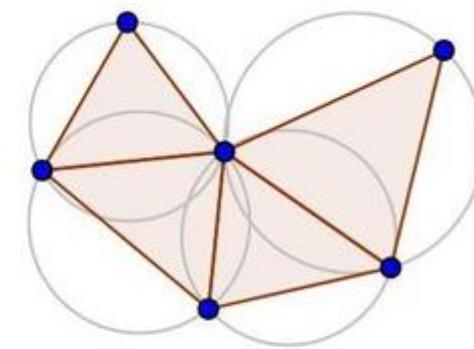
A collection of points



A Delaunay triangle

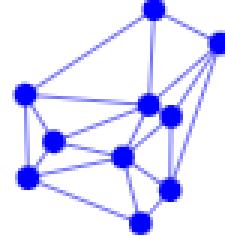


A non-Delaunay triangle

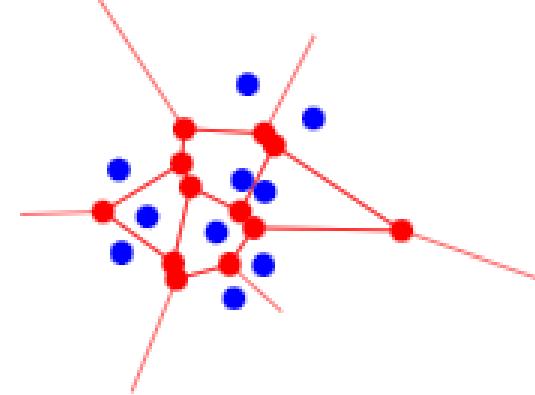


A Delaunay triangulation

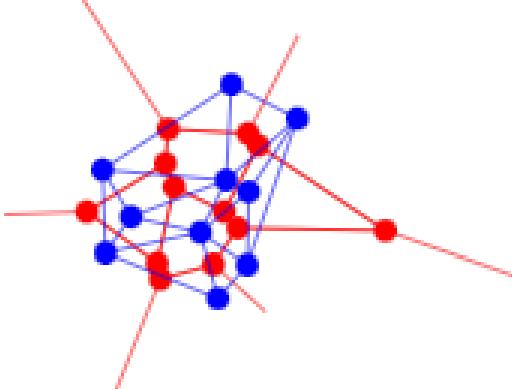
ในการนิการคำนวณความหนาแน่นของจุดเลเซอร์ (PD) จะทำการสร้างรูปหลายเหลี่ยม Voronoi diagram โดยรูปหลายเหลี่ยมนี้เป็นสิ่งที่คู่กันของ Delaunay Triangulation รูปหลายเหลี่ยมนี้จะครอบคลุมเลเซอร์หนึ่งจุด โดยรูปหลายเหลี่ยมจะเกิดจากเส้นแบ่งครึ่งด้านของรูปสามเหลี่ยม Delaunay ตัดกันทำให้เกิดรูปหลายเหลี่ยม ซึ่งรูปหลายเหลี่ยมหนึ่งรูปจะบรรจุจุดเลเซอร์หนึ่งจุด รูปหลายเหลี่ยมที่อยู่ขอบของกลุ่มจุดเลเซอร์อาจไม่สามารถแสดงผลได้ที่เรียกว่า Infinite polygon ก็จะไม่นำมาพิจารณา



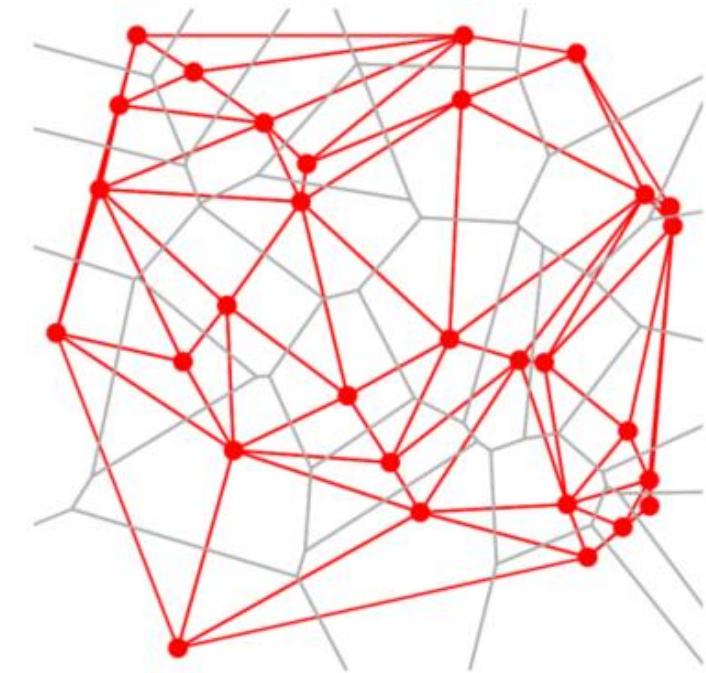
*Delaunay
triangulation*



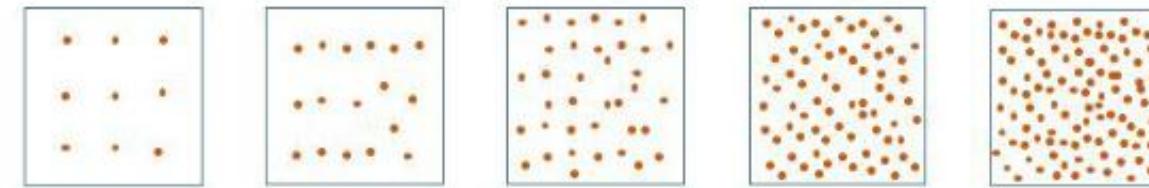
*Voronoi
diagram*



*Delaunay
and Voronoi*



ข่ายสามเหลี่ยม Delaunay (เส้นสีแดง) รูปหลายเหลี่ยม Voronoi (เส้นสีเทา)
ที่สร้างขึ้นจากกลุ่มของจุดเลเซอร์ (จุดสีแดง)



Point Density	0.5-1 pts/m ²	1-2 pts/m ²	2-5 pts/m ²	5-10 pts/m ²	10+ pts/m ²
Application	<ul style="list-style-type: none"> Basic Surface Model Forest Inventory 	<ul style="list-style-type: none"> Flood Modelling Dam and Water Inundation Calculations 	<ul style="list-style-type: none"> Multi-purpose data sets 	<ul style="list-style-type: none"> Basic 3D models 	<ul style="list-style-type: none"> Detailed 3D city models

Sparse point clouds (0.5-1 pts/m²)

Point clouds with such low point densities are normally collected for large scale digital height models. Subsets of these point clouds (either based on return number or classification) are used to create surface layers like the digital terrain model (DTM), digital surface model (DSM), normalized height model or the canopy height model used in forestry applications.

Low density point clouds (1-2 pts/m²)

At this point density the point spacing constitutes between 0.7 and 1m. This can be enough for flood modelling applications where even river and streams can be detected under forest canopies.

Medium density point clouds (2-5 pts/m²)

Very often a compromise between point density and cost of acquisition, these data sets are suitable for satisfying most usages. They might not be dense enough for 3D building modelling but can certainly be used to be post-processed and analyzed to derive new products.

High density point clouds (5-10 pts/m²)

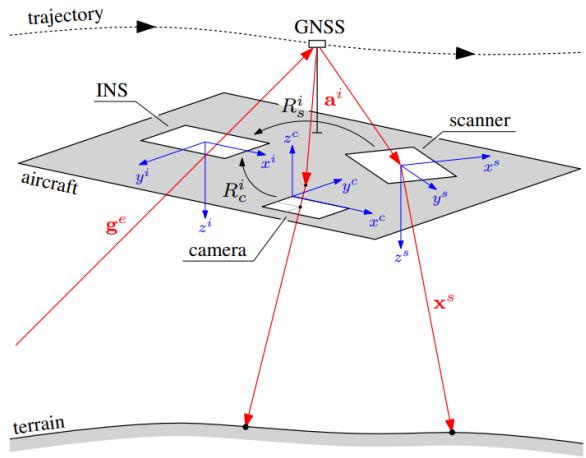
3D city modelling is one of the examples where a high point density will be required in order to capture the details of buildings. 5-10 pts/m² can be enough in order to capture the basic shapes of a building.

Extremely dense point clouds (10+ pts/m²)

Do you want to have a more detailed of your buildings? In that case you will certainly need a higher point density to capture all the details. For extremely high point densities it might also be worth to look at other technologies to be used instead of airborne LiDAR scanning or then maybe as an additional data source.

* หากเป็นกรณี ULS จะมีจำนวนสูงกว่า ALS ประมาณ 10 เท่า

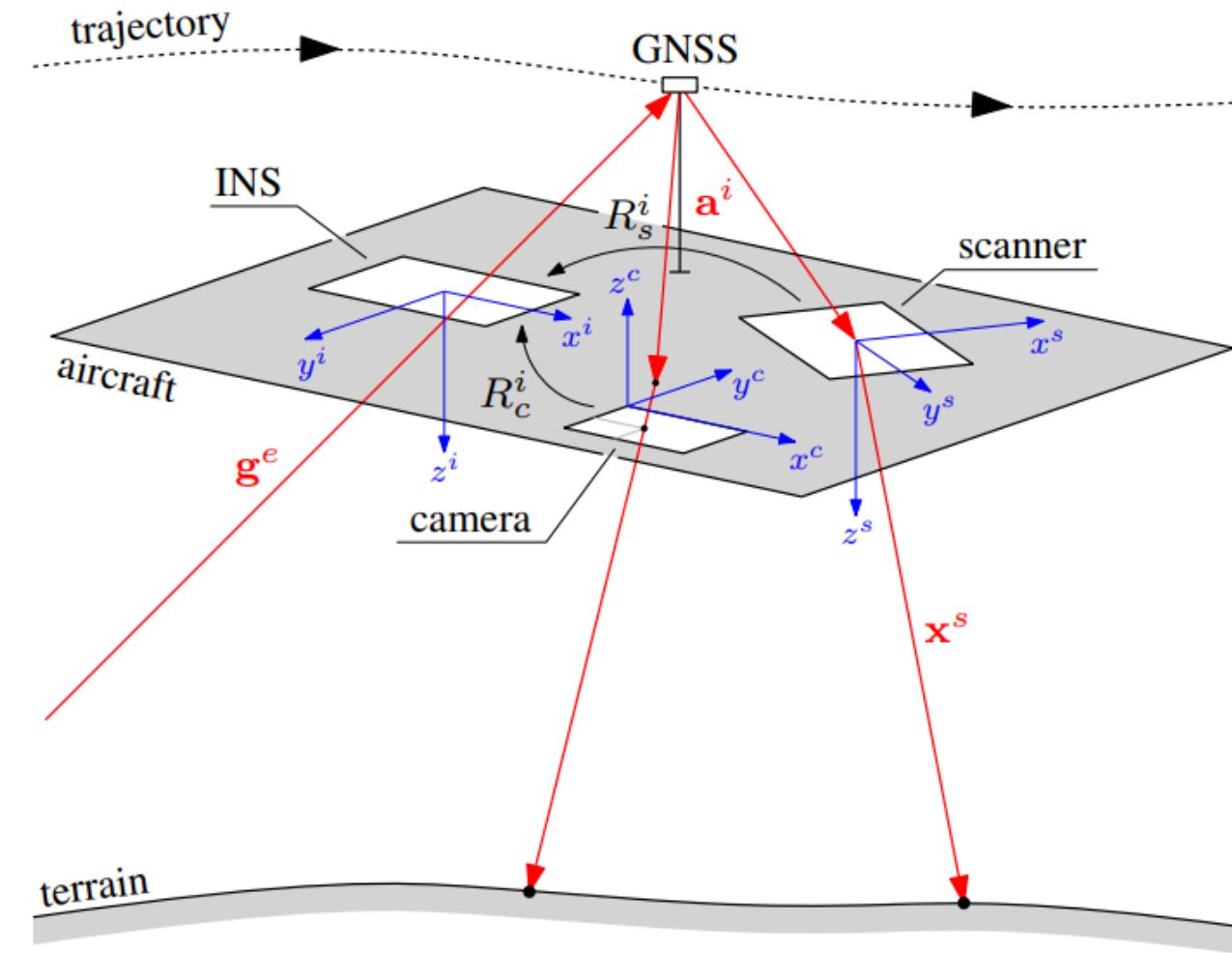
การกำหนดตำแหน่งบนโลกด้วยวิธีตรอง, ความคลาดเคลื่อนของการสแกนด้วยแสงเลเซอร์ และ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการปรับแก้



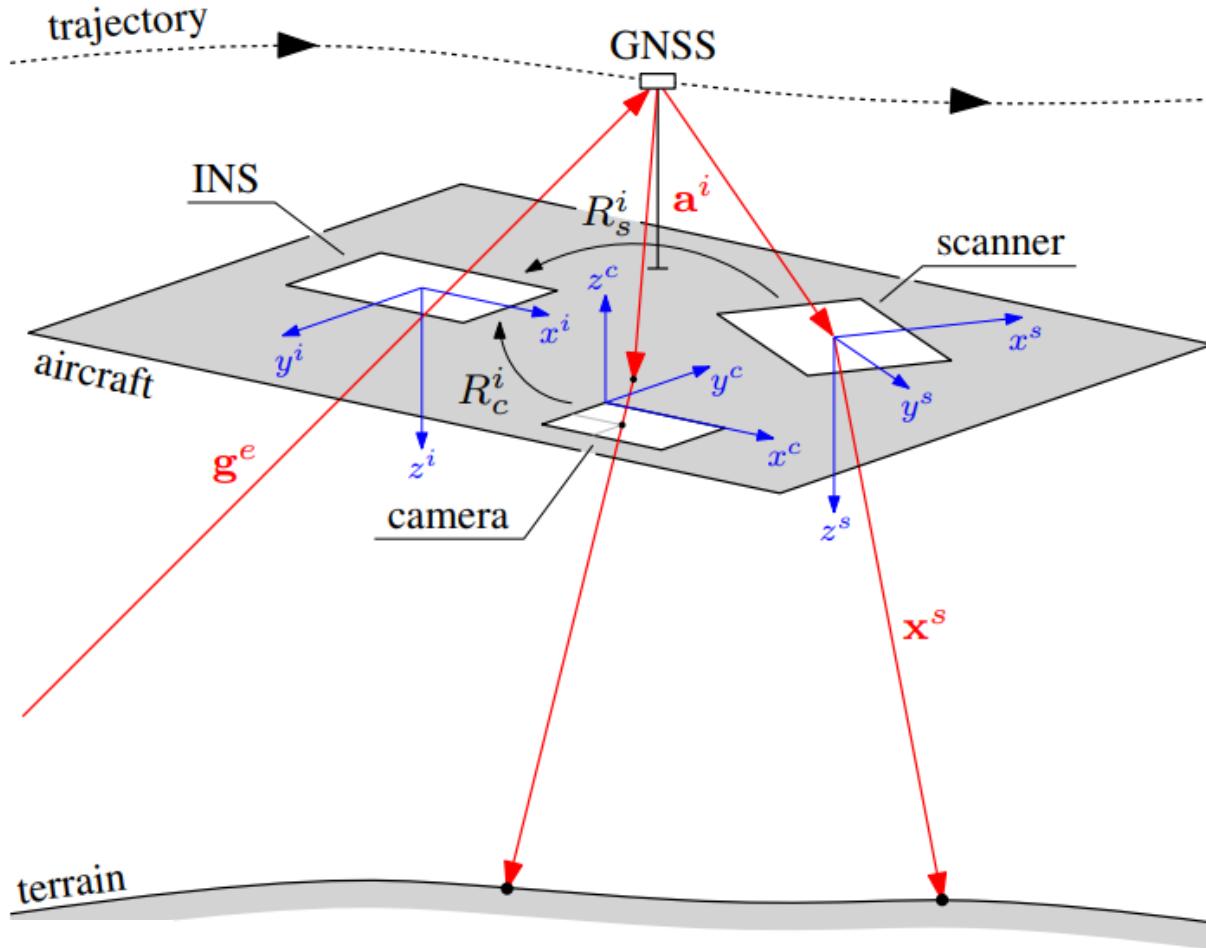
ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสำรวจด้วยไลดาร์ทางอากาศ จะมีค่าพิกัดสามมิติของระบบพิกัดอ้างอิงนั้น จะต้องมีการคำนวณโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์ร่วมกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ติดตั้งบนอากาศยาน รวมถึง GNSS/IMU จึงจะสามารถคำนวณหาค่าพิกัดของจุดที่แสงเลเซอร์ตกกระทบได้

สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอ้างอิงตำแหน่งพิกัดบนโลกโดยตรงกับข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสำรวจไลดาร์ จะใช้ข้อมูลจาก 3 ส่วน ในการคำนวณ ได้แก่

1. ข้อมูลระยะทางและมุมที่แสงวัดได้ของเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์
2. ข้อมูลวิถีการบินของอากาศยาน
3. พารามิเตอร์ของการวางแผนตัวของเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์



Mathematical foundation and parameter model



$R_{\text{source}}^{\text{target}}$

s: scanner CS

c: camera CS

i: INS CS, sometimes also referred to as body CS

n: navigation CS ($x = \text{north}$, $y = \text{east}$, $z = \text{nadir}$)

e: ECEF (earth-centered, earth-fixed) CS

$$\mathbf{x}_{[t]}^e(t) = \mathbf{g}^e(t) + R_n^e(t) R_i^n(t) \left(\mathbf{a}_{[l]}^i + R_{s[l]}^i \mathbf{x}_{[t]}^s \right) \quad (1)$$

whereby

- $\mathbf{x}_{[t]}^s$ is a 3-by-1 vector with the coordinates of the laser point $[t]$ in the s -system. Generally, these coordinates can be expressed as a function of three polar elements, i.e. the range $\rho_{[t]}$ and the angles $\alpha_{[t]}$ and $\beta_{[t]}$:

$$\mathbf{x}_{[t]}^s = \mathbf{x}_{[t]}^s(\rho_{[t]}, \alpha_{[t]}, \beta_{[t]}) \quad (2)$$

- $R_{s[l]}^i$ is a 3-by-3 rotation matrix describing the rotation from the s -system to the i -system, i.e. from the coordinate system of the laser scanner $[l]$ to the coordinate system of the INS. This rotation is usually denoted as *(boresight) misalignment* and is expressed through three Euler angles:

$$R_{s[l]}^i = R_{s[l]}^i(\alpha_{1[l]}, \alpha_{2[l]}, \alpha_{3[l]}) \quad (3)$$

- $\mathbf{a}_{[l]}^i$ is a 3-by-1 vector describing the positional offset between the phase centre of the GNSS antenna and the origin of the s -system. This vector is usually denoted as *lever-arm*:

$$\mathbf{a}_{[l]}^i = [a_{x[l]}^i \ a_{y[l]}^i \ a_{z[l]}^i]^T \quad (4)$$

Together, the lever-arm and the (boresight) misalignment angles form the *mounting calibration parameters*.

- $R_i^n(t)$ is a 3-by-3 rotation matrix describing the rotation from the i -system to the n -system, i.e. the local horizon system. This rotation constitutes the first (angular) part of the trajectory data. It can be estimated from the GNSS/INS measurements and is parametrized by three Euler angles roll ϕ , pitch θ , and yaw ψ :

$$R_i^n(t) = R_i^n(\phi(t), \theta(t), \psi(t)) \quad (5)$$

- $R_n^e(t)$ is a 3-by-3 rotation matrix describing the rotation from the n -system to the e -system. This rotation is not observed, but is a function of the longitude λ and latitude φ of the antenna's phase center position $\mathbf{g}^e(t)$:

$$R_n^e(t) = R_n^e(\lambda(t), \varphi(t)) \quad (6)$$

- $\mathbf{g}^e(t)$ is a 3-by-1 vector describing the position of the GNSS antenna in the e -system as second (translational) part of the trajectory data:

$$\mathbf{g}^e(t) = [g_x^e(t) \ g_y^e(t) \ g_z^e(t)]^T \quad (7)$$

ในการคำนวณจากการในสไลด์ก่อนหน้าจะมีค่าคาดเคลื่อนเชิงระบบແຜງอยู่ ซึ่งส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ประมวลผลได้มีความผิดเพี้ยนไปในข้อมูลพอยต์คลาวด์ของการคำนวณแนวบินนั้น ๆ โดยในการคำนวณปรับแก้เพื่อลดขนาดของค่าคาดเคลื่อนจะต้องอาศัยการวัดสอบและปรับแก้ค่าพารามิเตอร์เข้าไปทุกครั้ง โดยพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับเลเซอร์สแกน คือ พารามิเตอร์การวางแผนตัว (ประกอบไปด้วย การหมุน 3 พารามิเตอร์และการเคลื่อนที่ 3 พารามิเตอร์) ซึ่งหากกำหนดค่าเหล่านี้ผิด จะส่งผลถึงการรังวัดค่าพิกัดภาคพื้นดิน เช่น ความเพี้ยนของมุมการวางแผนตัวจะส่งผลถึงระยะของวัตถุที่วัดได้ ด้วยเหตุผลนี้การปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ในแต่ละแนวบินจะมีความพยายามที่จะปรับแก้และคำนวณค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบของการปรับแก้ทั้งระบบ โดยเฉพาะส่วนที่มีความเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์เหล่านี้ คือ ข้อมูลวิถีการบิน เนื่องจากในการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์การวางแผนของเลเซอร์สแกนเนอร์ในแต่ละแนวบินจะไม่มีผลต่อแนวบินอื่น ๆ

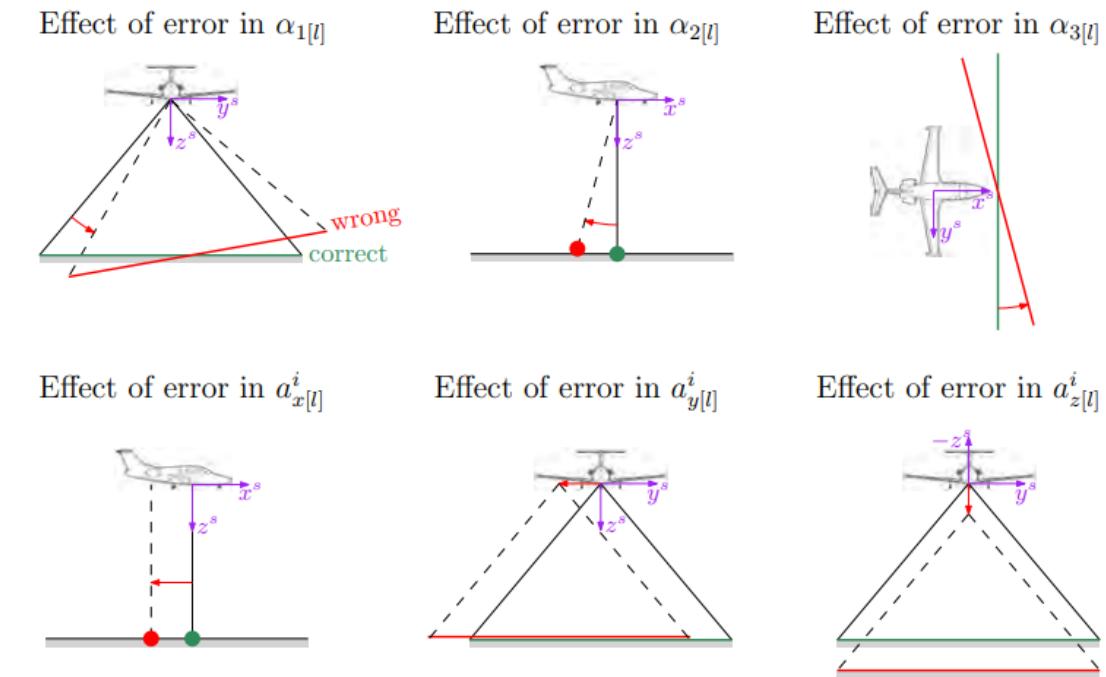
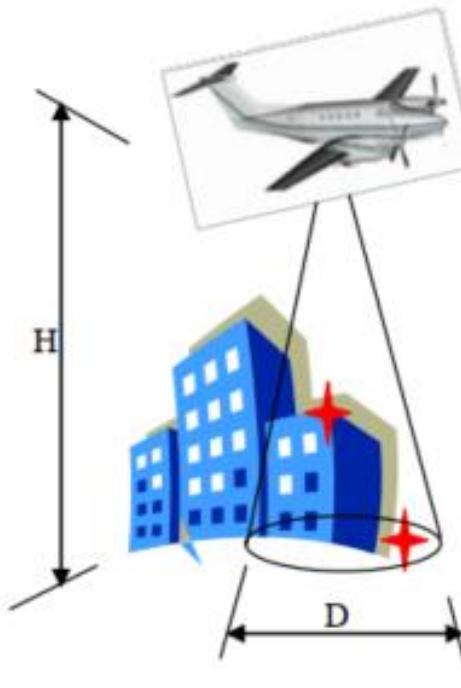


Figure 3.3: Effect of an erroneous mounting calibration (top: misalignment angles, bottom: lever-arm) on the georeference of lidar strips.

ความคลาดเคลื่อนของการสแกนด้วยแสงเลเซอร์ทางอากาศมักจะแฝงมา กับข้อมูลที่บันทึกมา โดยมักสังเกตได้จากข้อมูลพอยต์คลาวด์บริเวณส่วนซ้อนระหว่างแนวบินที่มีความแตกต่างทางความสูง แม้จุดตักษะทบทวนนั้นจะเป็นจุดบนพื้นผิวเดียวกันก็ตาม ซึ่งมีสาเหตุมาจากการหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น

- การกำหนดตำแหน่งบนโลกด้วยวิธีตรงที่คำนวณมาจากเซนเซอร์ที่ติดตั้งบนอากาศยานในการคำนวณหาวิถีของพาหนะ
- เกิดจากแสงเลเซอร์ที่มีรูปแบบและแหล่งที่มาที่หลากหลาย เช่น อาจเกิดจากการที่วัตถุไม่สะท้อนรังสีของแสงเลเซอร์ หรืออาจสะท้อนแล้วส่งผลให้ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์เปลี่ยนแปลงไป
- การหักเหและการเบี่ยงเบนของมุมสะท้อนที่ทำให้แสงเลเซอร์ไม่สะท้อนกลับเข้าเครื่องตรวจจับ
- ค่าระยะห่างและการวางแผนตัวของอุปกรณ์ GNSS/IMU กับเลเซอร์สแกนเนอร์ ซึ่งรวมไปถึงอายุการใช้งานของอุปกรณ์ที่ใช้ทำให้อุปกรณ์ภายใต้อาจมีการขยับไปจากเดิม (Drift) จึงเป็นสาเหตุที่ต้องมีการวัดสอบเครื่องมือ (Calibration) รวมถึงการ Misalignment ของข้อมูล
- การบันทึกข้อมูลของระบบรังวัดเซนเซอร์ต่าง ๆ ให้สอดคล้องตรงกัน (Time synchronization)
- ค่าคลาดเคลื่อนต่าง ๆ ในระบบรังวัดด้วยสัญญาณดาวเทียม GNSS
- การที่เลเซอร์เดินทางมาจากแหล่งกำเนิดที่มีระยะใกล้ โดยเฉพาะมาจากการบินสำรวจด้วยอากาศยาน ซึ่งในขณะที่เลเซอร์เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศจะมีการกระจาย (Disperse) เกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้ลำแสงเลเซอร์ที่ปลายทางขยายใหญ่ขึ้น (Beam divergence)

การขยายของแสงเลเซอร์นี้สามารถคำนวณได้จาก



$$D = H \cdot \tau$$

โดย D คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของป้ายลำแสงเลเซอร์

H คือ ค่าป้ายบนของลำแสงเลเซอร์ (Beam divergence)

τ คือ ระยะทางห่างของแหล่งกำเนิด หรือความสูงบิน

ตัวอย่าง ระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศ Optech Orion มี beam divergence $\tau = 0.25 \text{ mrad}$ หากบินปฏิบัติงานที่ระดับเพดานบิน $H=1,000$ เมตร จากระดับพื้นผิวภูมิประเทศ โดยเฉลี่ย สัญญาณเลเซอร์จะปลายบนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D เป็น

$$D = H \cdot \tau$$

$$D = 1000 \cdot \frac{0.25}{1000} = 0.25 \text{ เมตร}$$

สำหรับระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศอื่น ๆ Beam divergence จะอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.5 mrad หากทำการบินสำรวจด้วยเลเซอร์ที่เพดานบินเฉลี่ย 1,000 เมตร ดังนั้นเลเซอร์ที่กระทบพื้นผิวโดยเฉลี่ยจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 0.3 ถึง 0.5 เมตร

เหตุผลที่ต้องปรับแก้เป็นแนวบิน เนื่องจากความคลาดเคลื่อนที่แฝงอยู่ในข้อมูลพอยต์คลาวด์สามารถตรวจสอบได้ในบริเวณส่วนซ้อนของแนวบิน จึงเป็นสาเหตุที่ต้องทำให้ปรับแก้เป็นแนวบินเพื่อให้มีความถูกต้องทางตำแหน่งเพิ่มมากขึ้น โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการปรับ แก้ข้อมูล พอยต์คลาวด์เป็นแนวบิน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท

1. Data Driven Model : เป็นการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์โดยอาศัยการวัดค่าความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่พับในส่วนซ้อนของ แนวบิน ซึ่งฟังก์ชันในการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ประเภทนี้จะถูกกำหนดไว้สำหรับแต่ละแนวบินโดยเฉพาะ และมีการเลือกพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของฟังก์ชัน เช่น ค่า Shift และมุ่งหมุนระหว่างข้อมูลพอยต์คลาวด์ของ 2 แนวบิน เป็นต้น
2. Sensor System Model : เป็นการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ยึดโยงกับแบบจำลองจากระบบเซนเซอร์รังวัดต่าง ๆ ที่ติดตั้งอยู่กับเครื่องมือ สำรวจ ซึ่งมีความเชื่อมโยงกับจุดพอยต์คลาวด์แต่ละจุดที่ใช้ในการรังวัดได้ โดยสำหรับระบบที่มีการติดตั้งอยู่ในเครื่องมือสำรวจ ได้แก่ ระบบ GNSS ที่เกี่ยวข้องกับค่าพิกัดตำแหน่งในขณะปฏิบัติงาน และระบบ INS ที่เกี่ยวข้องกับค่าการเอียงตัวของเครื่องมือ

Sensor System Model : เป็นการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้โดยกับแบบจำลองจากระบบเซนเซอร์รังวัดต่าง ๆ ที่ติดตั้งอยู่กับเครื่องมือสำรวจ ซึ่งมีความเชื่อมโยงกับจุดพอยต์คลาวด์แต่ละจุดที่ใช้ในการรังวัดได้

$$p_{i,j} = f(O(t_i), R(t_i), r_i, \alpha_i, s)$$

โดยที่	t	คือ เวลา ณ ขณะที่รังวัดจุดพอยต์คลาวด์นั้น ๆ
	$O(t_i)$	คือ จุดกำเนิดของระบบพิกัดอ้างอิง
	$R(t_i)$	แนววางตัวของระบบพิกัดอ้างอิง
	r_i	ระยะทางที่เลเซอร์วัดระยะได้
	α_i	มุมที่เลเซอร์ปล่อยออกไปกระทบกับวัตถุ
	s	เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับระบบการรังวัด เช่น ระยะชดเชย (offset) จากตำแหน่งของเสาอากาศรับสัญญาณถึงเลเซอร์สแกนเนอร์ เป็นต้น

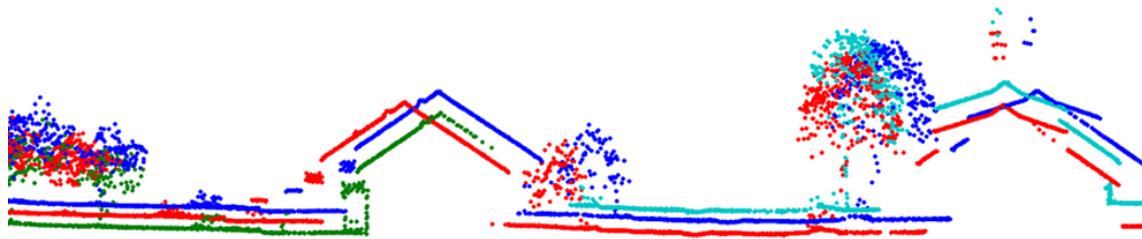
การรังวัดระยะทางด้วยเลเซอร์ (l , length) จะสามารถทำให้เกิดความสัมพันธ์กับค่าพิกัดภาคพื้นดินได้ด้วยการทราบตำแหน่งและทิศทางของลำแสงเลเซอร์ที่ถูกปล่อยออกจากอุปกรณ์ ดังสมการที่ :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_G = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + R_{IMU} R_{IMU}^{LRF} R_M \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ l \end{pmatrix}$$

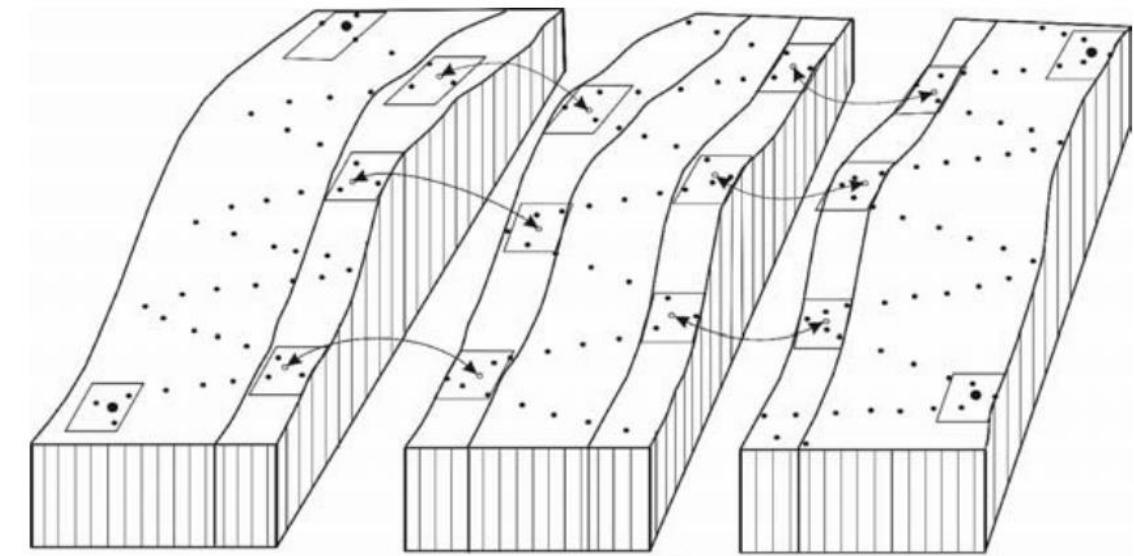
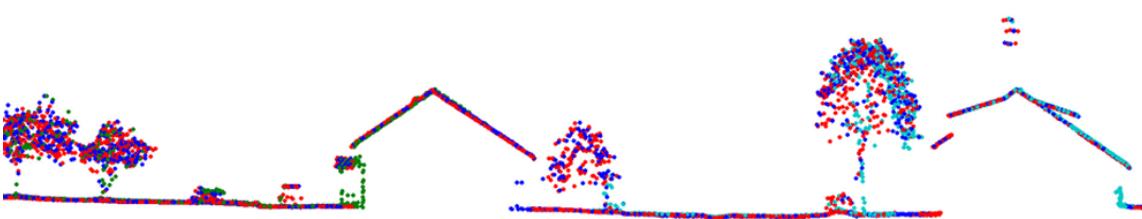
- โดยที่ $(X, Y, Z)_G$ คือ ค่าพิกัดของจุดบนพื้นดิน
 (X_0, Y_0, Z_0) คือ ค่าพิกัดของเลเซอร์สแกนเนอร์ (ทราบได้จากการรังวัดค่าพิกัดด้วยระบบ GNSS โดยมีการวัดระยะชดเชยจากเลเซอร์สแกนเนอร์จนถึงจานรับสัญญาณ)
 R_{IMU} คือ เมทริกซ์การหมุนของมุมระหว่าง IMU เทียบกับแกนอ้างอิงของระบบพิกัดจากภาคพื้นดิน
 R_{IMU}^{LRF} คือ เมทริกซ์การหมุนของมุมระหว่างเลเซอร์สแกนเนอร์ และ IMU
 R_M คือ เมทริกซ์การหมุนของกระจากสะท้อนแสงเลเซอร์ที่ติดอยู่ในอุปกรณ์ไลดาร์ (มุมกว้าง, Scanning angle)

เนื่องจากการบันทึกข้อมูลจากเลเซอร์สแกนเนอร์มีการบันทึกจากหลาย ๆ แนวบิน เป็นไปได้ว่าผลการคำนวณค่าพิกัดของจุดเลเซอร์อาจมีความคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบระหว่างแนวบิน จึงต้องมีการคำนวณปรับแก้ระหว่างแนวบินที่เรียกว่า Strip adjustment

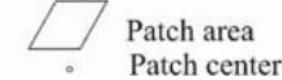
BEFORE



AFTER

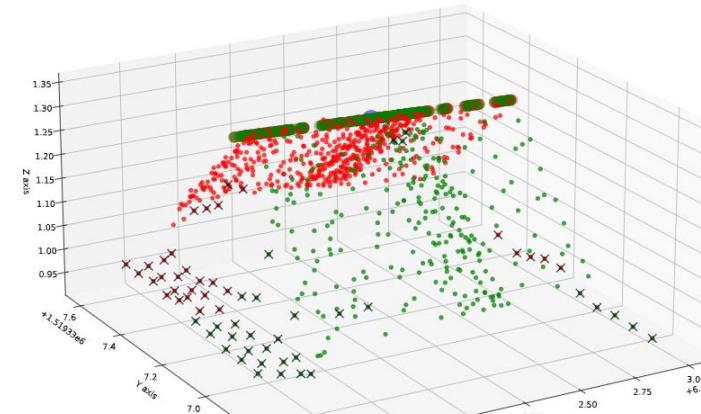


- Height control points
- Laser scanner points

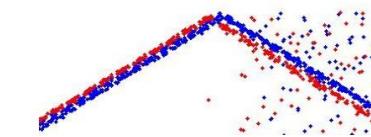


Patch area
Patch center

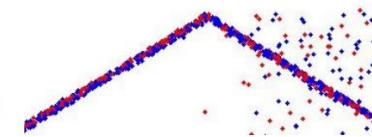
การจัดทำเป้าไลเดาร์ล่วงหน้าแบบรูปทรงจั่วหลังคาที่ทราบถึงลักษณะโครงสร้าง ขนาดเป้า และการวางตัว ประกอบกับจำนวนข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ละเอียดหนาแน่นมากขึ้นแล้ว จะทำให้สามารถปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนในทางตำแหน่งในทางราบ ทางดิ่ง และค่าการเอียงตัวของอุปกรณ์ขณะรังวัดได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น



ตัวอย่างผลลัพธ์



$$\begin{aligned}\Delta X' &= 34.3 \text{ cm} \\ \Delta Y' &= -12.2 \text{ cm} \\ \Delta Z' &= 4.2 \text{ cm}\end{aligned}$$



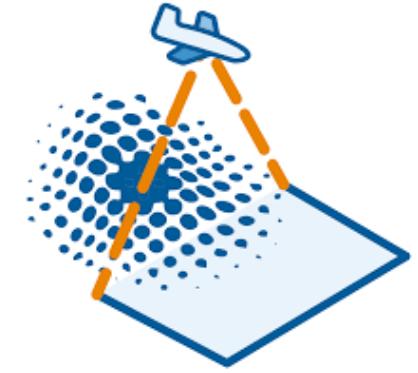
$$\begin{aligned}\Delta X' &= 1.8 \text{ cm} \\ \Delta Y' &= -0.2 \text{ cm} \\ \Delta Z' &= -1.9 \text{ cm}\end{aligned}$$

Figure 6. Relative displacements between strip 160 (blue) and 161(red) before and after strip adjustment.

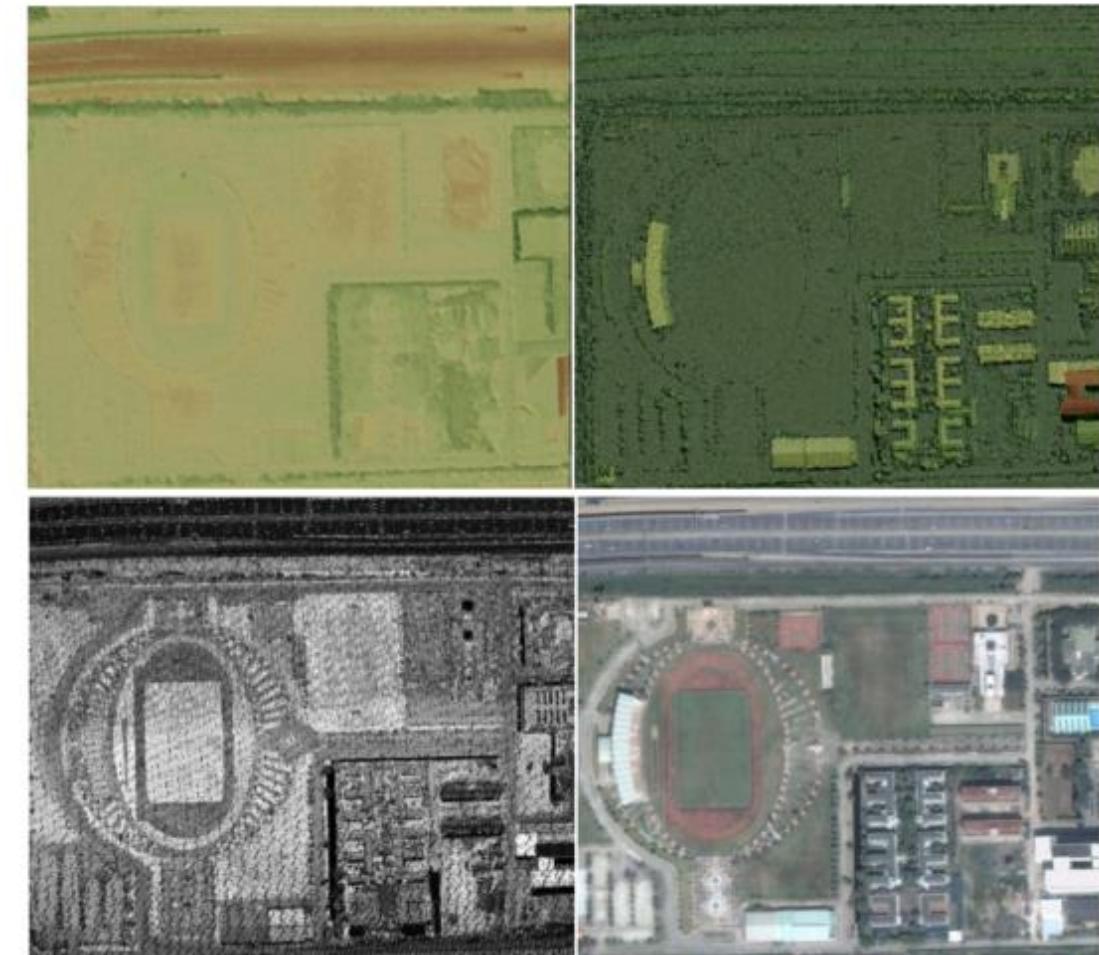
Table 4. Relative displacements of 25 tie elements before and after strip adjustment.

	r.m.s. planimetry [cm]	r.m.s. height [cm]
before strip adjustment	32.5	6.4
after strip adjustment	11.7	6.9

ผลผลิตเลเซอร์สแกนเนอร์ และ การแสดงผลข้อมูลพอยต์คลาวด์



ผลจากการรังวัดด้วยเลเซอร์สแกนเนอร์ที่สำคัญ คือข้อมูลกลุ่มจุดระดับที่มีความหนาแน่นที่เรียกว่า ข้อมูลพอยต์คลาวด์ จุดระดับที่ได้จะมีทั้งค่าพิกัดทางราบและค่าระดับ โดยกลุ่มจุดระดับนี้อาจเป็นได้ทั้งอาคาร สิ่งปลูกสร้าง พืชพรรณธรรมชาติ พื้นผิวน้ำ รวมทั้งจุดระดับบนภูมิประเทศ โดยสามารถนำจุดข้อมูลเหล่านี้ไปแสดงเป็นแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศได้ทันที นอกจากนั้นด้วยคุณลักษณะของการสะท้อนกลับของลูกคลื่นลูกสุดท้ายจากหอยลูกคลื่นทำให้ระบบสามารถจำแนกจุดบนพื้นดินออกจากจุดอื่น ๆ ซึ่งจะเรียกว่า จุดไม่ได้จำแนก โดยจุดบนพื้นดินสามารถนำมาใช้ผลิตแบบจำลองภูมิประเทศ และในอีกรูปแบบหนึ่ง คือการแสดงภาพของความเข้มของการสะท้อนสัญญาณเลเซอร์ ที่อาจนำมาใช้เป็นแผนที่ภาพออร์โธ หากแต่ว่ามีความละเอียดของจุดภาพและโทนสีที่แตกต่างไปจากแผนที่ภาพออร์โธที่ได้จากการถ่ายทางอากาศ



ซ้ายบน: แบบจำลองระดับ, ขวาบน: แบบจำลองพื้นผิว

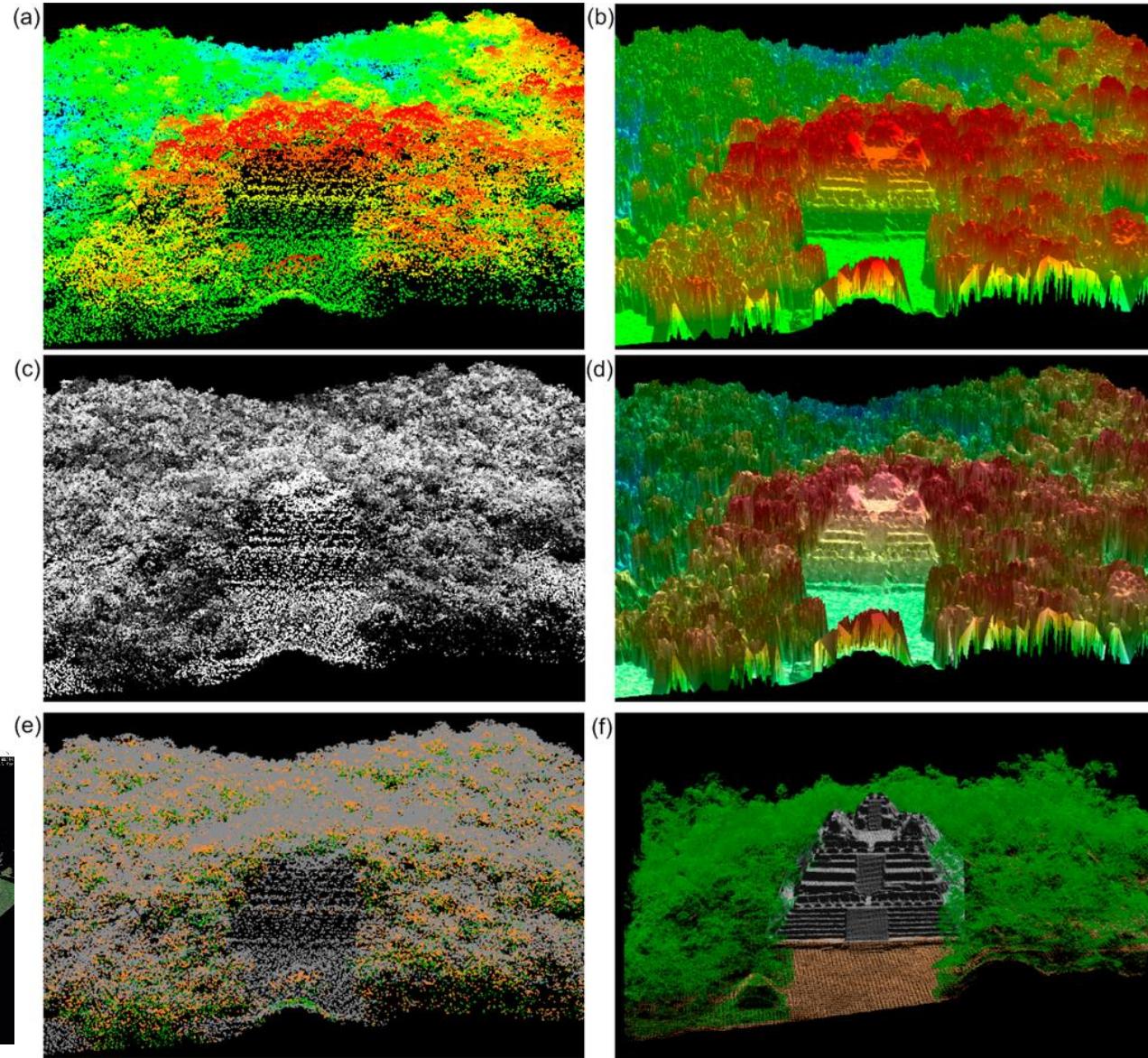
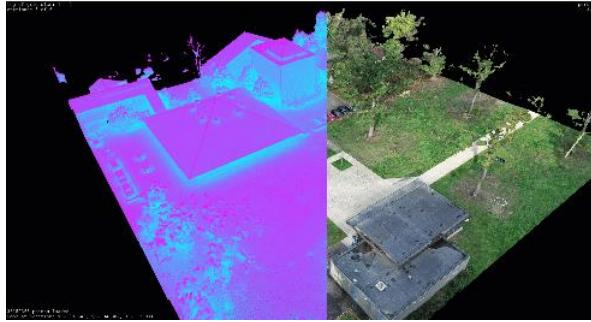
ซ้ายล่าง: ภาพความเข้มสัญญาณ, ขวาล่าง: ภาพถ่ายดาวเทียมรายละเอียดสูง

การแสดงผลข้อมูลพอยต์คลาวด์

การแสดงผลข้อมูลจากไลดาร์เป็นการนำข้อมูลของแต่ละจุดภาพมาแสดงด้วยรหัสสี โดยพื้นฐานทุก ๆ จุดของข้อมูลเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศจะมีค่าพิกัดแผนที่ทางราบ (X,Y) อยู่แล้ว สำหรับข้อมูลประจำจุดที่สามารถนำมาแสดงผลได้ ได้แก่ ค่าระดับความสูง (Z), ค่าความเข้มของสัญญาณ (Intensity), จำนวนการสะท้อนกลับ (Number of Return), ชั้นการจำแนก (Classification) เป็นต้น

Visualization of the point cloud (PC)

- (a) PC colored by elevation
- (b) Triangulated Irregular Network (TIN) colored by elevation
- (c) PC colored by return intensity
- (d) TIN colored by elevation and intensity
- (e) PC colored by classification
- (f) Hybrid PC and TIN



สมาคมทางวิชาชีพ American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) ร่วมกับผู้ผลิตเครื่องมือเลเซอร์สแกนเนอร์ ได้กำหนดมาตรฐานรูปแบบของการจัดเก็บข้อมูลระดับไลดาร์ในรูปแบบใบหน้าเรียกว่า LAS format ปรากฏในมาตรฐาน LiDAR Data Exchange Format Standard

Table 1: LAS 1.4 Format Definition

PUBLIC HEADER BLOCK
VARIABLE LENGTH RECORDS (VLR)
POINT DATA RECORDS
EXTENDED VARIABLE LENGTH RECORDS (EVLR)

Table 3: Public Header Block

Item	Format	Size	Required
File Signature ("LASF")	char[4]	4 bytes	*
File Source ID	unsigned short	2 bytes	*
Global Encoding	unsigned short	2 bytes	*
Project ID - GUID data 1	unsigned long	4 bytes	
Project ID - GUID data 2	unsigned short	2 byte	
Project ID - GUID data 3	unsigned short	2 byte	
Project ID - GUID data 4	unsigned char[8]	8 bytes	
Version Major	unsigned char	1 byte	*
Version Minor	unsigned char	1 byte	*
System Identifier	char[32]	32 bytes	*
Generating Software	char[32]	32 bytes	*
File Creation Day of Year	unsigned short	2 bytes	*
File Creation Year	unsigned short	2 bytes	*
Header Size	unsigned short	2 bytes	*
Offset to point data	unsigned long	4 bytes	*
Number of Variable Length Records	unsigned long	4 bytes	*
Point Data Record Format	unsigned char	1 byte	*
Point Data Record Length	unsigned short	2 bytes	*
Legacy Number of point records	unsigned long	4 bytes	*
Legacy Number of points by return	unsigned long [5]	20 bytes	*
X scale factor	double	8 bytes	*
Y scale factor	double	8 bytes	*
Z scale factor	double	8 bytes	*
X offset	double	8 bytes	*
Y offset	double	8 bytes	*
Z offset	double	8 bytes	*
Max X	double	8 bytes	*
Min X	double	8 bytes	*
Max Y	double	8 bytes	*
Min Y	double	8 bytes	*
Max Z	double	8 bytes	*
Min Z	double	8 bytes	*
Start of Waveform Data Packet Record	Unsigned long long	8 bytes	*
Start of first Extended Variable Length Record	unsigned long long	8 bytes	*
Number of Extended Variable Length Records	unsigned long	4 bytes	*
Number of point records	unsigned long long	8 bytes	*
Number of points by return	unsigned long long [15]	120 bytes	*

Table 6: Variable Length Record Header

Item	Format	Size	Required
Reserved	unsigned short	2 bytes	
User ID	char[16]	16 bytes	*
Record ID	unsigned short	2 bytes	*
Record Length After Header	unsigned short	2 bytes	*
Description	char[32]	32 bytes	

Table 22: Extended Variable Length Record Header

Item	Format	Size	Required
Reserved	unsigned short	2 bytes	
User ID	char[16]	16 bytes	*
Record ID	unsigned short	2 bytes	*
Item	Format	Size	Required
Record Length After Header	unsigned long long	8 bytes	*
Description	char[32]	32 bytes	

POINT DATA RECORDS

LAS file I/O software must use the "Offset to point data" field in the Public Header Block to locate the starting position of the first Point Data Record. Note that all Point Data Records must be the same type (i.e. Point Data Record Format). Point data items that are not 'Required' must be set to the equivalent of zero for the data type (e.g. 0.0 for floating types, null for ASCII, 0 for integers).

Point Data Record Format 6-10 have improved several aspects of the core information in the point data records, particularly support for 256 classes and the definition of a specific "Overlap" bit. While all point record formats (0 – 10) are supported in LAS 1.4, the preferred formats are 6-10.

Table 7: Point Data Record Format 0

Item	Format	Size	Required
X	long	4 bytes	*
Y	long	4 bytes	*
Z	long	4 bytes	*
Intensity	unsigned short	2 bytes	
Return Number	3 bits (bits 0 – 2)	3 bits	*
Number of Returns (given pulse)	3 bits (bits 3 – 5)	3 bits	*
Scan Direction Flag	1 bit (bit 6)	1 bit	*
Edge of Flight Line	1 bit (bit 7)	1 bit	*
Classification	unsigned char	1 byte	*
Scan Angle Rank (-90 to +90) – Left side	char	1 byte	*
User Data	unsigned char	1 byte	
Point Source ID	unsigned short	2 bytes	*

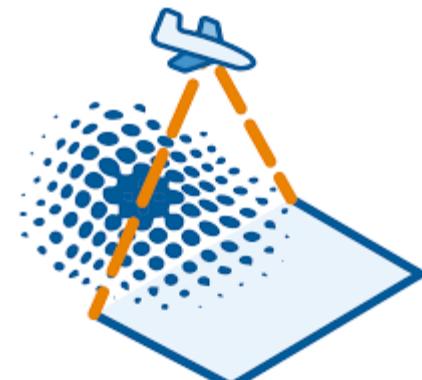


LAS Specification 1.4 - R15

Release Information:

Version Approved – November 2011

Revision date – 09 July 2019



เมื่อผู้ใช้ได้รับข้อมูลไลดาร์มาแล้ว ในครั้งแรกอาจเรียกได้ว่าเป็นข้อมูลดิบที่ยังไม่จำแนกใด ๆ (created-never classified) ด้วยลักษณะการสะท้อนกลับหلامของไลดาร์ที่เดินทางผ่านสิ่งปักคลุมภูมิประเทศ และการสะท้อนกลับเพียงครั้งเดียว ทำให้การผลิตข้อมูลไลดาร์ในขั้นต้นมีการจำแนกจุดบนพื้นดิน Ground กับจุดอื่น ๆ (Unclassified) โดยการจำแนกนี้จะมีการเข้ารหัสประจำระดับนั้น ๆ เพื่อสะดวกต่อการเรียกใช้งานการแสดงผล โดย ASPRS ได้กำหนดมาตรฐานการจัดเก็บข้อมูล LAS ภายใต้มาตรฐานนี้สำหรับจุดเลเซอร์แต่ละจุดจะมีคุณลักษณะต่าง ๆ กำกับและคุณลักษณะอันหนึ่งคือการจำแนก โดยมีรหัสต่าง ๆ ที่ง่ายต่อการนำไปประมวลผลในขั้นต่อ ๆ ไป

Table 9: ASPRS Standard LiDAR Point Classes (Point Data Record Format 0-5)

Classification Value (bits 0:4)	Meaning
0	Created, never classified
1	Unclassified¹
2	Ground
3	Low Vegetation
4	Medium Vegetation
5	High Vegetation
6	Building
7	Low Point (noise)
8	Model Key-point (mass point)
9	Water
10	Reserved for ASPRS Definition
11	Reserved for ASPRS Definition
12	Overlap Points²
13-31	Reserved for ASPRS Definition



การประยุกต์ใช้งาน Laser Scanning

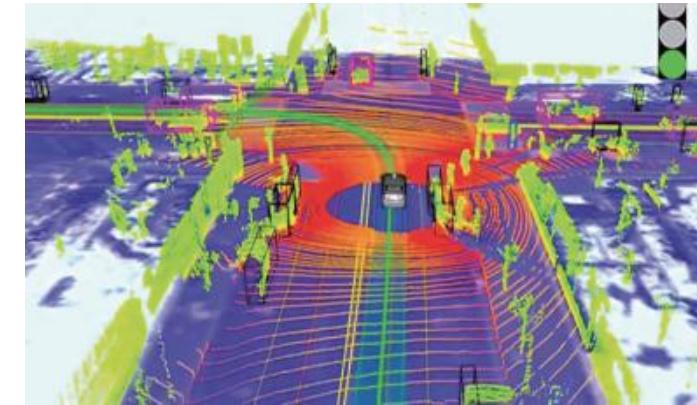
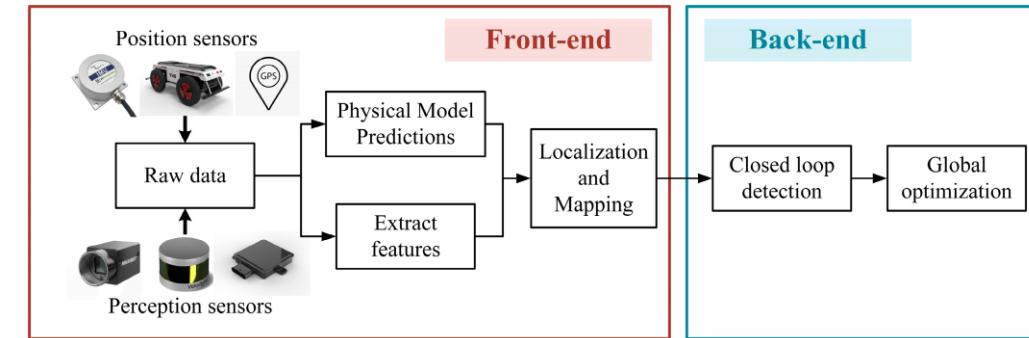
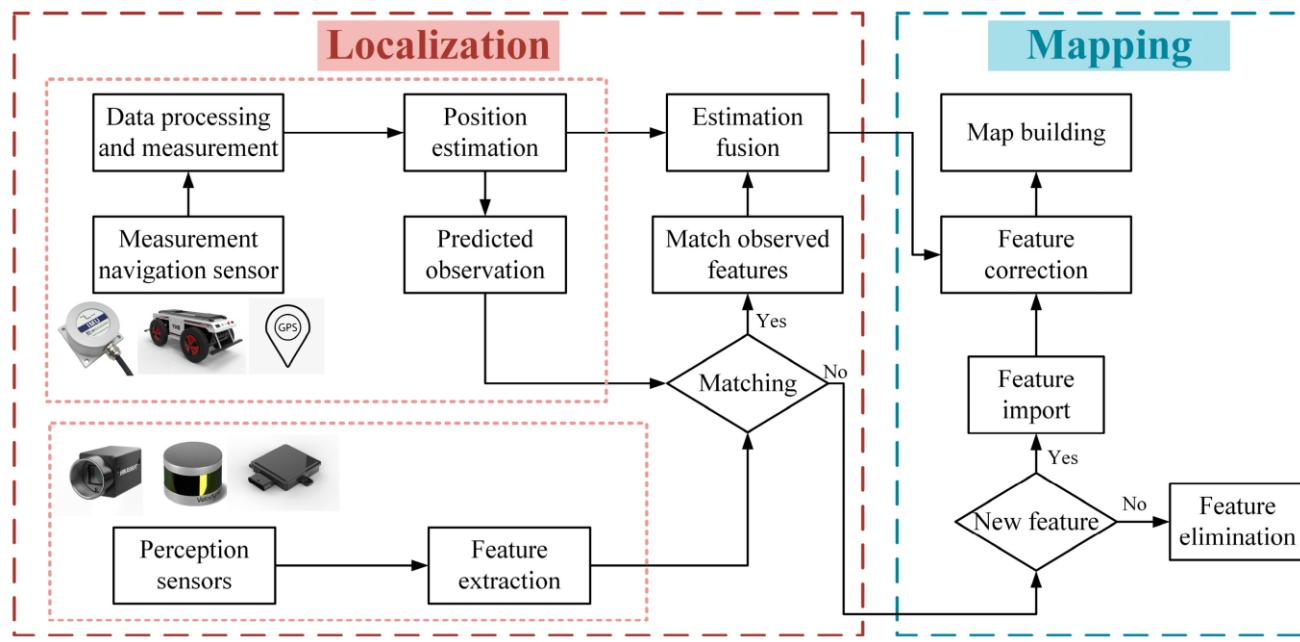


- Airborne Laser Scanning (ALS)
- Unmanned Aerial Vehicle Laser Scanning (ULS)
- Mobile Laser Scanning (MLS)
- Terrestrial Laser Scanning (TLS)
- Hand-held Laser Scanning (HLS) + SLAM
- Airborne Laser Bathymetry (ALB) for Hydrographic survey

* บางครั้งอาจมีการใช้คำว่า LiDAR แทน Laser



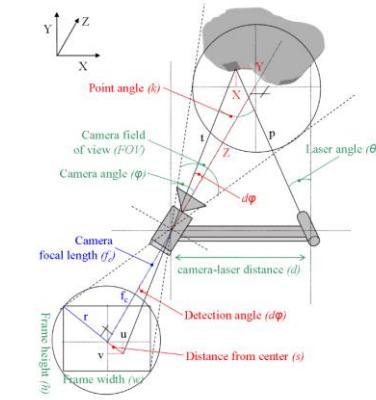
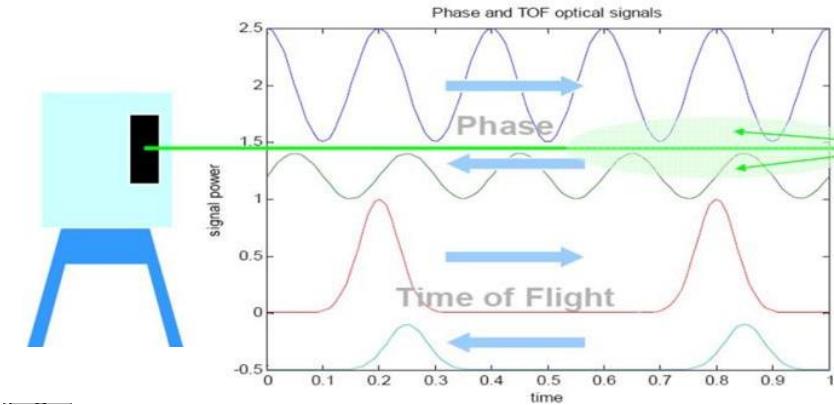
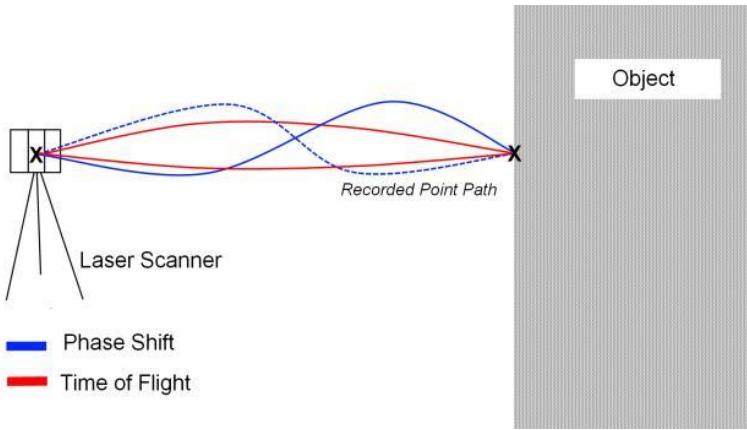
การระบุตำแหน่งพร้อมกับการสร้างแผนที่ (SLAM) เป็นกระบวนการแก้ปัญหาการเคลื่อนที่ของวัตถุ (เช่น หุ่นยนต์ อากาศยานไร้คนขับ ยานยนต์ไร้คนขับ เป็นต้น) ในสภาพแวดล้อมที่ไม่รู้จัก ซึ่งในขณะเริ่มต้นการทำงานวัตถุจะไม่มีข้อมูลของสภาพแวดล้อม จึงจำเป็นต้องทำการสร้างแผนที่ของสภาพแวดล้อมขึ้นจากข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์รับรู้จากนั้นทำการระบุตำแหน่งของวัตถุจากแผนที่นี้ เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ตำแหน่งของวัตถุจะถูกคำนวณค่าเพื่อนำไปใช้สร้างแผนที่จากข้อมูลของสภาพแวดล้อมใหม่ที่ได้รับ ซึ่งข้อมูลสภาพแวดล้อมใหม่นี้จะมีความสัมพันธ์กับแผนที่ในอดีตที่เคยสร้างขึ้นที่สามารถนำไปปรับปรุงตำแหน่งของวัตถุได้ต่อไป ดังนั้นการระบุตำแหน่งและการสร้างแผนที่จึงมีความเกี่ยวข้องกันมาก ที่ต้องอาศัยการทำงานไปพร้อมกันเพื่อใช้ประโยชน์จากข้อมูลซึ่งกันและกัน

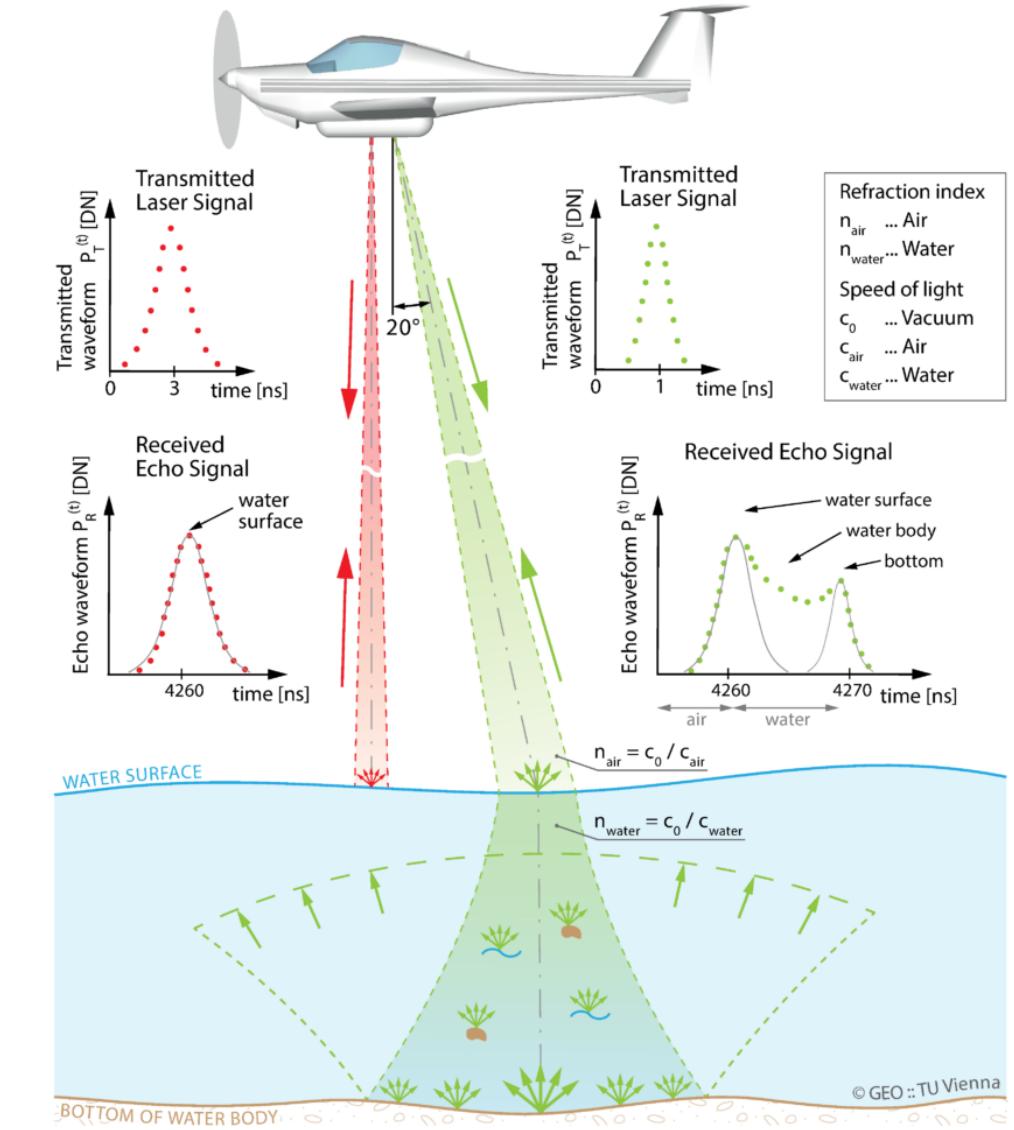
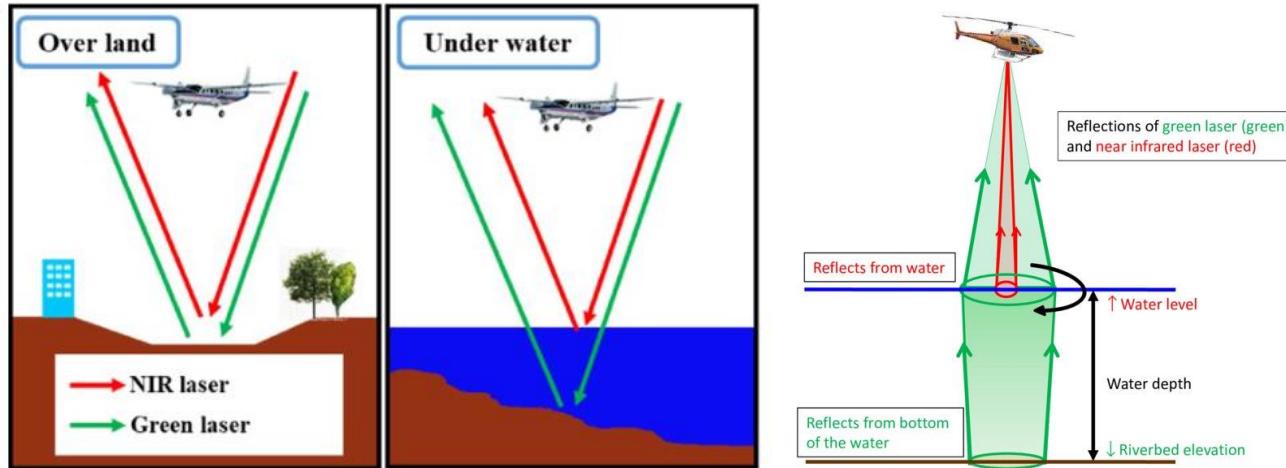
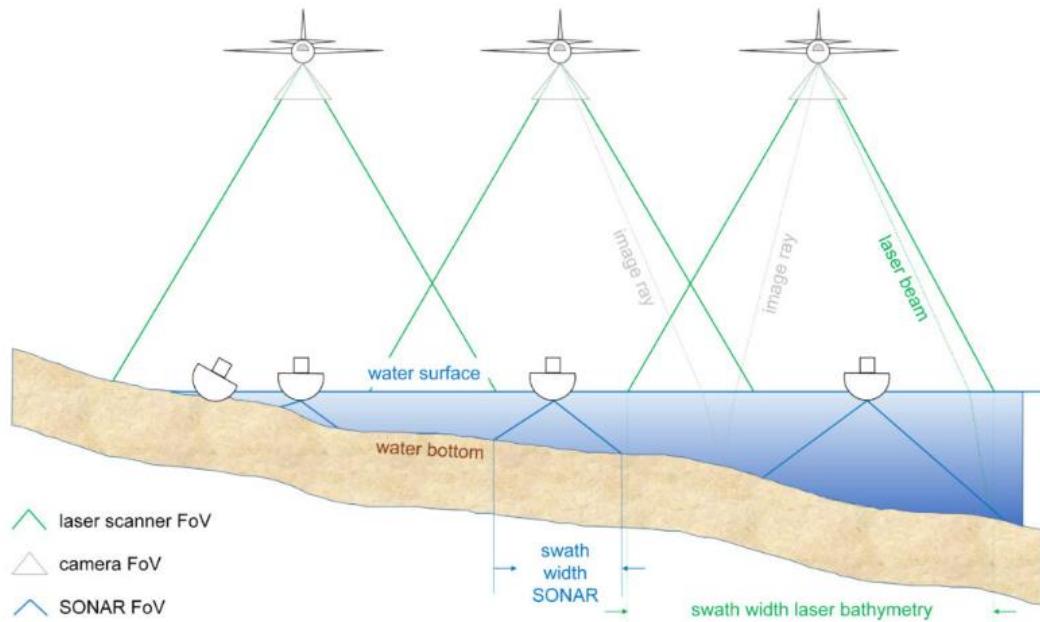


เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Terrestrial Laser Scanning : TLS)

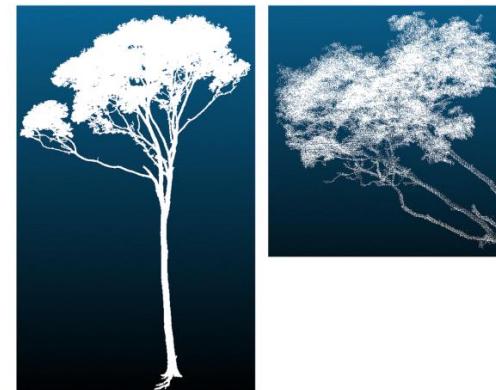
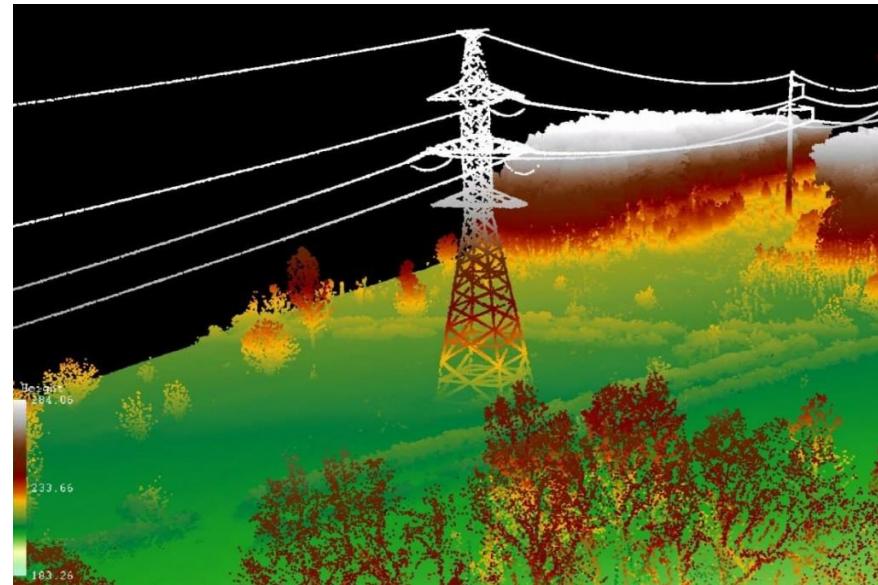
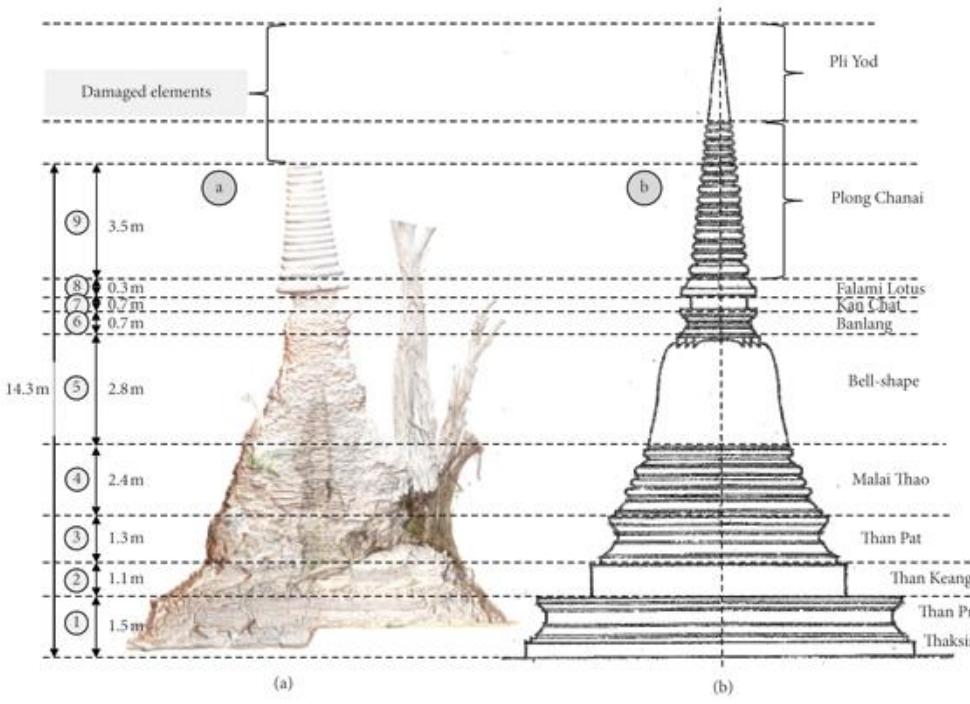
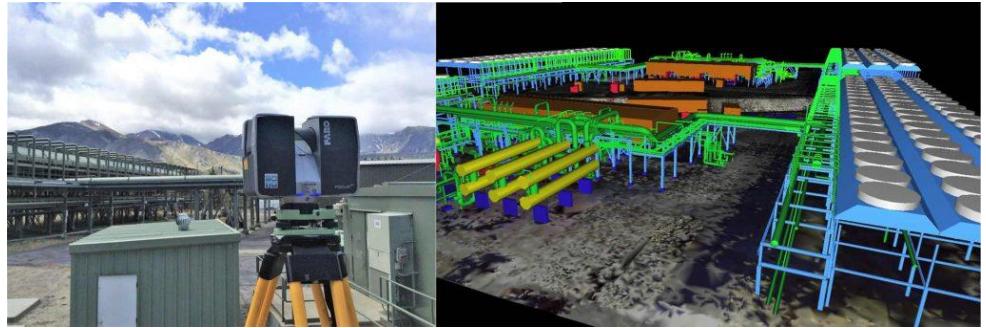
เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Terrestrial Laser Scanning : TLS) แบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักใช้หลักการวัดระยะทางเป็นตัวแปร ได้แก่ การวัดด้วยระยะเวลาเดินทางของแสงเลเซอร์ (Time of Flight), การวัดด้วยผลต่างเฟสคลื่นของเลเซอร์ (Phase measurement) และการวัดด้วยข่ายสามเหลี่ยมของเรดาร์ (Laser radar and optical triangulation)

คุณลักษณะ	ประเภทของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน		
	การวัดด้วยระยะเวลาเดินทางของเลเซอร์	การวัดระยะด้วยเฟสของคลื่น	การวัดระยะด้วยการวัดแบบสามเหลี่ยม
หลักการวัดข้อมูล	ใช้การจับเวลาเพื่อวัดระยะทางที่สแกน	ใช้หลักการหาค่าความต่างของเฟสที่สะท้อนกลับมาจากวัตถุ	ใช้หลักการวัดแบบสามเหลี่ยม ซึ่งมีตำแหน่งเซนเซอร์ใน การรับสัญญาณอยู่ห่างออกจากจุดส่งสัญญาณเลเซอร์
ระยะการสแกน	100 – 1000 เมตร	ระยะไม่เกิน 100 เมตร	10 เมตร
ความถูกต้องของการวัดระยะทาง	10 มิลลิเมตร	ต่ำกว่า 10 มิลลิเมตร	ต่ำกว่า 1 มิลลิเมตร

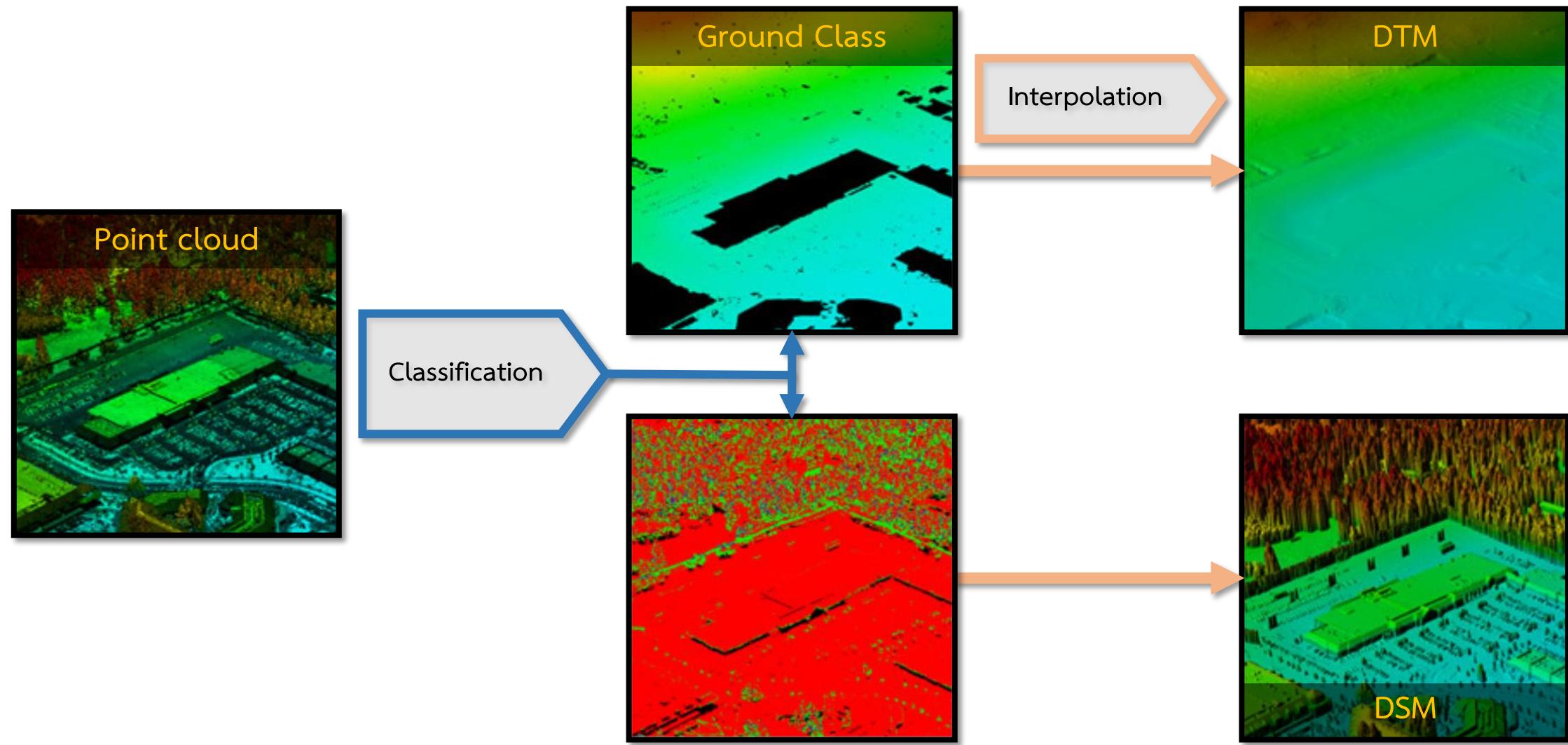




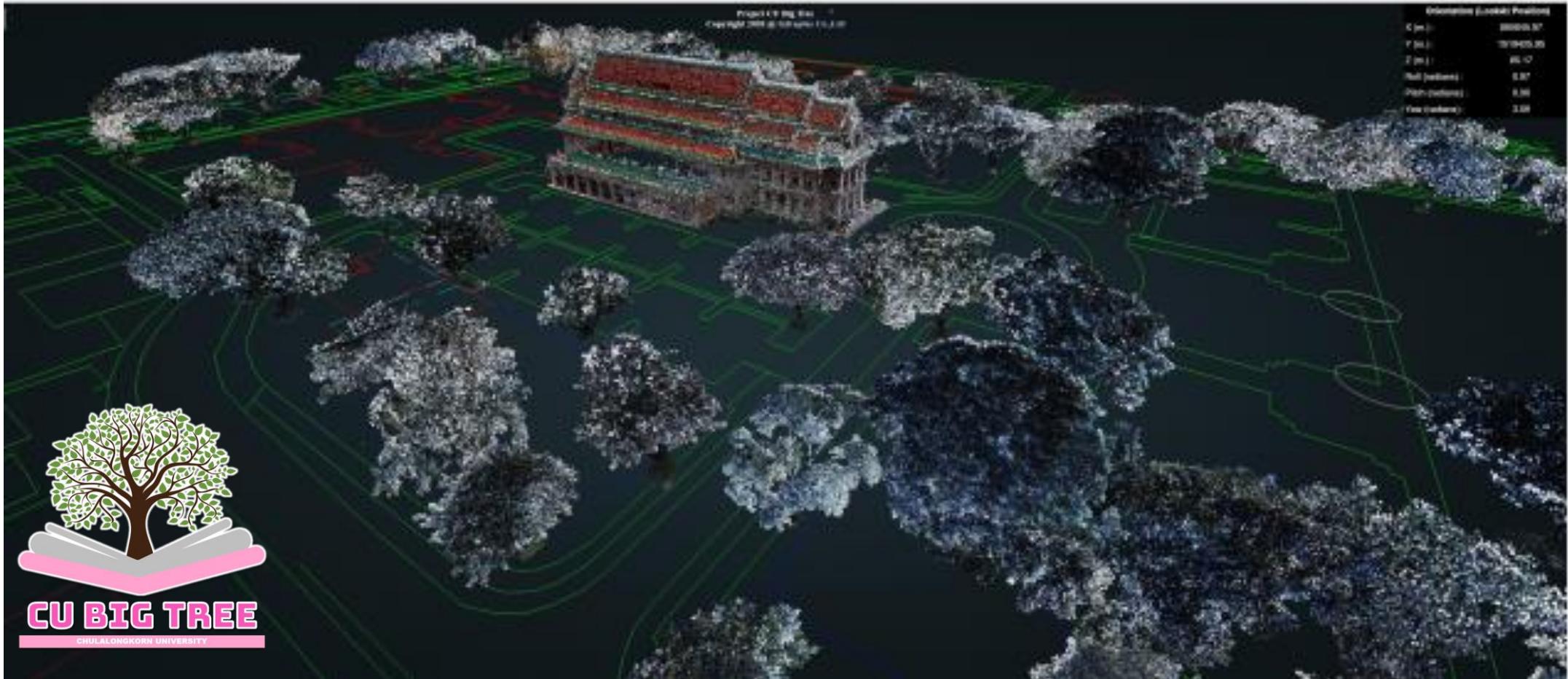
การประยุกต์ใช้งาน Laser Scanning



การสร้างแบบจำลองความสูงภูมิประเทศนิด DTM และ DSM



การบริหารจัดการต้นไม้ขนาดใหญ่ในมหาวิทยาลัย (CU-Big Tree 2020 : TLS + HLS)



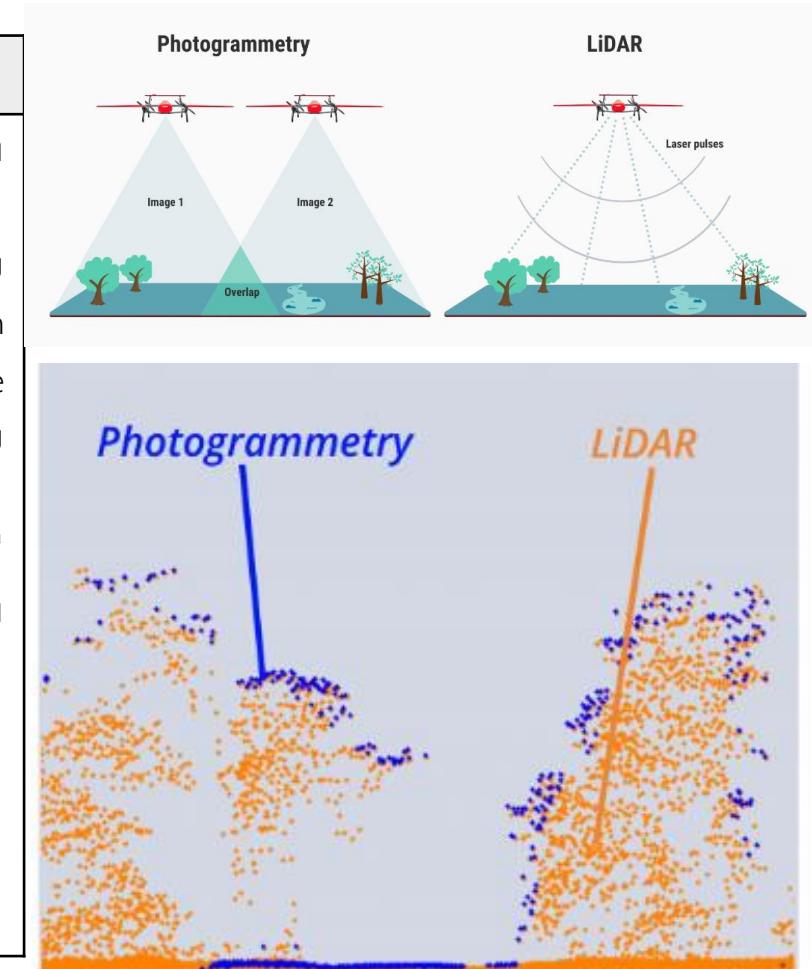
URL: <https://cu-big-tree.web.app/map> , <http://infraplus-dev.org/cubigt/main2.php>

PMCU Smart City (2020 - 2022) UAV-P / Point Cloud

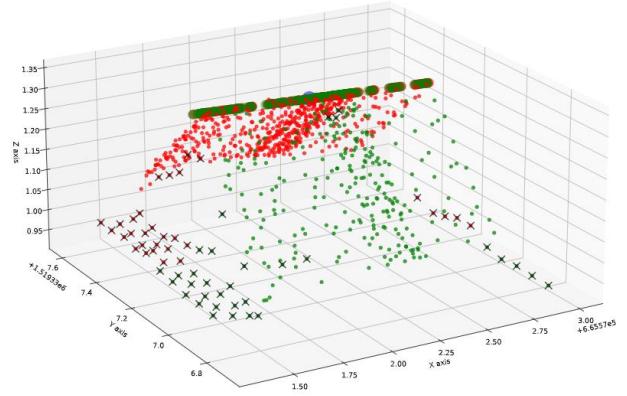


URL: <https://cu-pointcloud.web.app/viewer/CU-UAV/CU-pointcloud?x=665175.6&y=1518388.49&z=600&yaw=50&pitch=-0.75>

การสำรวจวัดไลดาร์	การสำรวจวัดด้วยภาพถ่าย
<ul style="list-style-type: none"> การทำงานสามารถทำได้ทั้งกลางวันและกลางคืนและสภาพอากาศไม่อำนวยสำหรับการถ่ายภาพทางอากาศเนื่องจากเลเซอร์มีพลังงานในตัวเอง การรังวัดตำแหน่งพิกัดโดยตรงจากภูมิประเทศ ทำให้ได้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ความละเอียดถูกต้องสูง และมีจุดระดับความหนาแน่นมาก กรณีเป็นป่าไม้หรือพืชพรรณปักคลุมหนาทึบหากไลดาร์ที่ประกอบจากเครื่องกำเนิดเลเซอร์มีความถี่สูง ยังมีโอกาสบ้างที่จะได้ค่าระดับความสูงของพื้นผิวภูมิประเทศบ้างเนื่องจากเลเซอร์บางส่วนยังตกลงไปบนพื้นภูมิประเทศได้ รังวัดได้ทั้งกลุ่มจุดระดับของพื้นผิวสิ่งปลูกสร้าง พืชพรรณ พื้นผิวภูมิประเทศ และภาพความเข้มของสัญญาณ 	<ul style="list-style-type: none"> อาศัยการส่องสว่างจากดวงอาทิตย์และต้องการมุมสูงของอาทิตย์ที่พอเหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงแสงเงาที่หอด้วยวนรูป ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ผลิตได้มาจากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศที่มีส่วนซ้อนทับของภาพที่มากพอ (High Overlap) และนำไปประมวลผลผ่านหลักการ Structure from Motion (SfM) ซึ่งเป็นวิธีการรังวัดตำแหน่งพิกัดโดยอ้อม ผลลัพธ์ที่ได้มีความหลากหลายทั้งแบบจำลองระดับ แผนที่ภาพถ่ายอร์โธ ข้อมูลพอยต์คลาวด์ และแบบจำลองสามมิติ



ซอฟต์แวร์ที่สเปิดสำหรับตรวจสอบ คุณภาพเป้าควบคุมก่อนประมวลผล



```
python ChkLCP_strip.py -h  
usage: ChkLCP_strip.py [-h] [-r REDUCE] [-s SHRINK] [-y] [-l LIMIT] LAS_PATTERN
```

Read lidar by flight-strip and analyze if any LCP falls on any flight-strip, then write the result in YAML for processing in further step with EstimLCP.py.
(P.Santitamnont,Chula.Unive Feb,2023

positional arguments:

LAS_PATTERN input LAS_PATTERN "./Data/AA450/LasFile/AA450-*/*.las"

options:

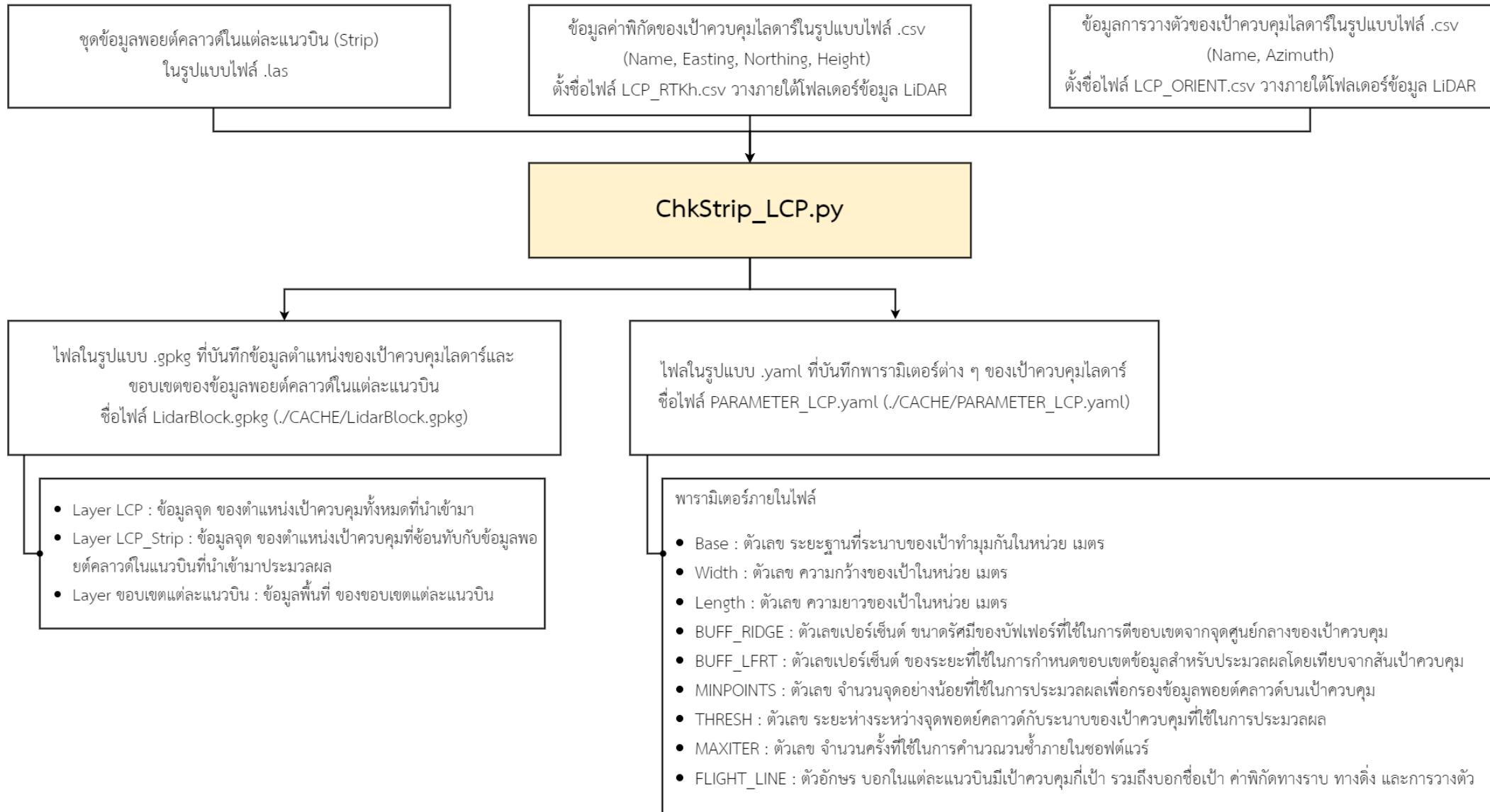
-h, --help show this help message and exit

-r REDUCE, --reduce REDUCE
 reduce number of point-cloud, default 1000-times, suggest 10/100/1000/10000

-s SHRINK, --shrink SHRINK
 shrink polygon hulling point-cloud by default -5 meter

-y, --yaml generate YAML file for later used by EstimLCP.py...

-l LIMIT, --limit LIMIT
 limit only first n-files !!! FOR DEBUG !!!



```
python EstimLCP.py -h
```

```
usage: EstimLCP.py [-h] [-c] [-p] [-s STRIP] [-l LCP] YAML
```

Detect and estimate 3D coordinate of a Gable-roof Lidar Control Plane(LCP)

positional arguments:

YAML input YAML configuration file for LCP detection and positioning

options:

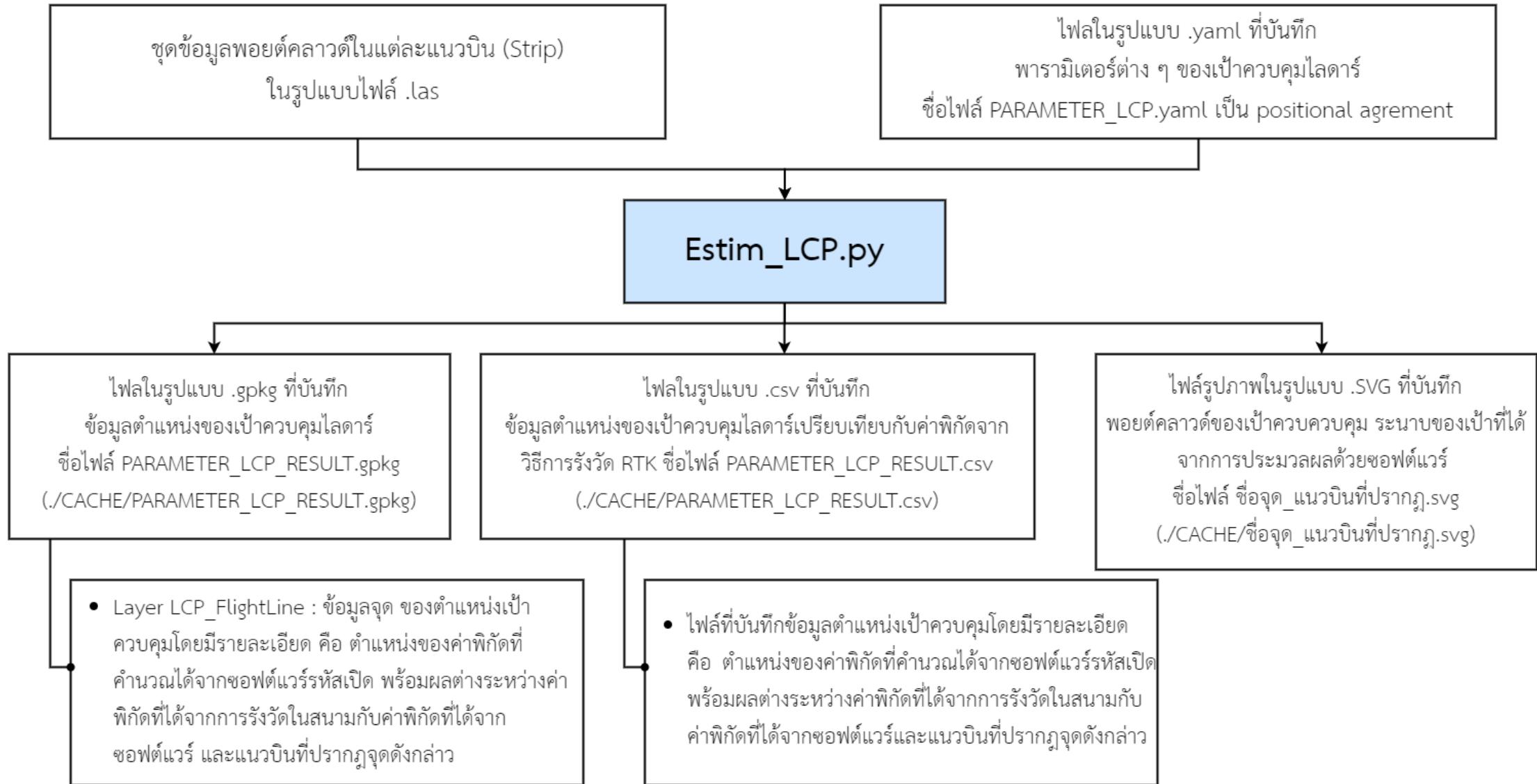
-h, --help show this help message and exit

-c, --cache caching the circled target, for DEBUG only !!!

-p, --plot plot 3d LCP target and point cloud

-s STRIP, --strip STRIP
 limit processing by specifying strip name

-l LCP, --lcp LCP limit processing only LCP ,otherwise process all LCPs





Thank You