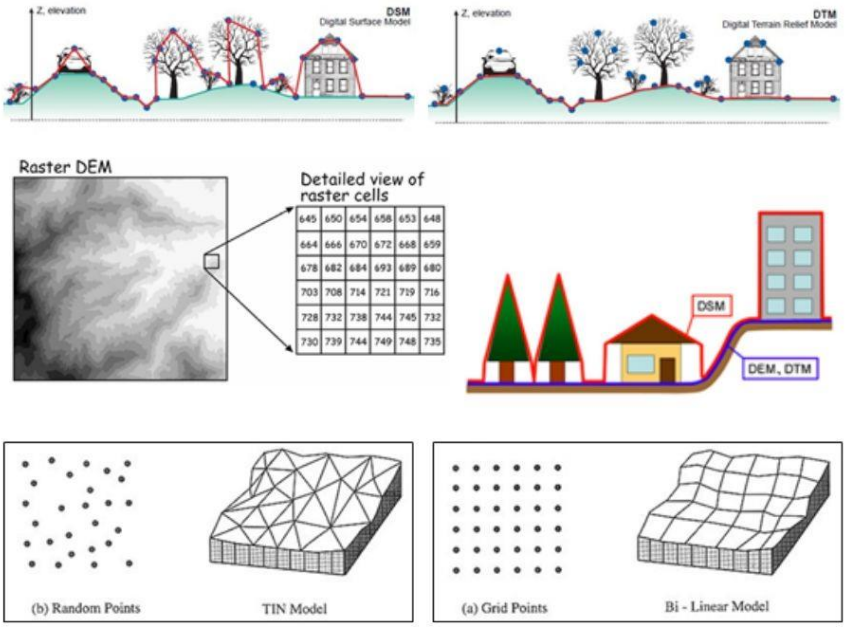
การทำแผนที่สามมิติ
THREE-DIMENSIONAL MAPPING



แบบจำลองความสูงเชิงเลข
DIGITAL ELEVATION MODEL

NATTHAWUT TANANTHAISONG

GEOGRAPHY AND GEO-INFORMATION

แบบจำลองความสูงเชิงเลข

Digital Elevation Model

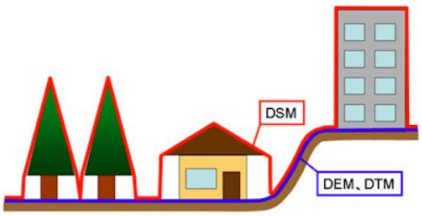
แบบจำลองระดับสูงเชิงเลข คือข้อมูลที่มีค่าความสูงของภูมิประเทศที่ถูกจัดเก็บไว้เป็นข้อมูลรูปแบบข้อมูลตารางกริดแล้วนำมาจัดเก็บในรูปแบบดิจิทัล โดยแต่ละตารางกริดจะเก็บค่าความสูงทางภูมิประเทศตามระยะความระเอียดที่มี โดยแต่ละแผนที่จะแสดงลักษณะภูมิประเทศเป็นพื้นผิวที่ต่อเนื่อง สามารถแสดงด้วยเส้นชั้นความสูง ซึ่งเสมือนเป็นรูปหลายเหลี่ยมที่ซ้อนกันอยู่เป็นชั้น ๆ อย่างไรก็ตามเส้นชั้นความสูงไม่เหมาะที่จะใช้ในการวิเคราะห์เชิงเลข หรือทำการวิเคราะห์จึงมีการพัฒนาวิธีการต่าง ๆ ที่จะสามารถแสดงความสูงต่ำของพื้นที่เชิงเลขคือ แบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีแต่ข้อมูลระดับสูงเพียงอย่างเดียว ปัจจุบันมีการพัฒนาแบบจำลองภูมิประเทศเชิงเลขไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลรูปแบบอื่น ๆ ข้อมูลดังกล่าว สามารถนำมาวิเคราะห์ระดับความสูงต่ำของพื้นที่ ความลาดชันของพื้นที่ การสร้างภาพสามมิติ การหันรับแสง ความสูงต่ำเชิงเงา

ข้อมูลความสูงภูมิประเทศ

ข้อมูลแบบจำลองความสูงภูมิประเทศ คือการจัดเก็บค่าความสูงภูมิประเทศในรูปแบบของข้อมูลตารางกริด หรือข้อมูลแรสเตอร์ โดยแสดงค่าความสูงทางภูมิประเทศตามระยะความละเอียดที่มีหน่วยตามระยะบนพื้นผิวโลก เช่น ความละเอียดจุดภาพเท่ากับ 2 x 2 เมตร คือ 1 กริด ครอบคลุมพื้นที่บนผิวโลกจริงเท่ากับ 2 เมตร คูณ 2 เมตร และค่าความสูงในพื้นที่นั้นจะเท่ากับค่า Value ที่บันทึกใน กริด สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (2556 : 2) เป็นต้น

1. Digital Surface Model (DSM)

การจำลองความสูงของภูมิประเทศ และจัดเก็บให้อยู่ในรูปแบบตารางกริด หรือข้อมูลแรสเตอร์ โดยรวมความสูงของสิ่งปกคลุมพื้นผิวทางกายภาพของโลกด้วย เช่น สิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้ และพุ่มไม้ เป็นต้น ดังภาพประกอบ 5.1

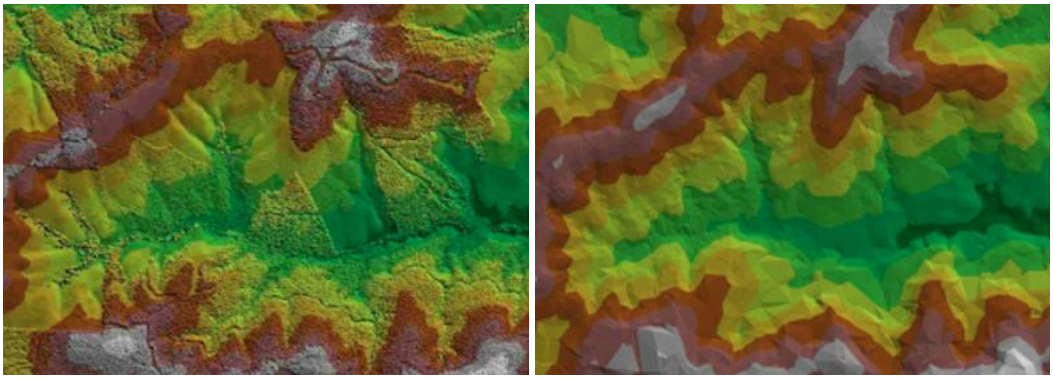


ภาพประกอบ 5.1 การจัดเก็บความสูง

ที่มา : NSDI Thailand (2555 : 1)

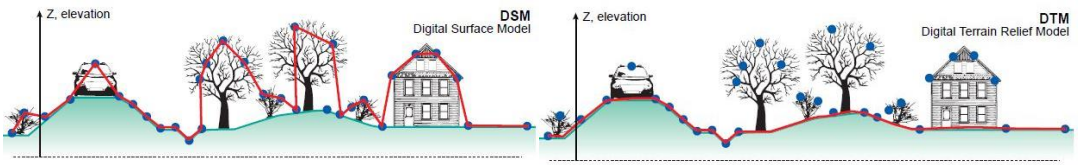
2. Digital Terrain Model (DTM) / Digital Elevation Model (DEM)

การจำลองความสูงของภูมิประเทศ และจัดเก็บให้อยู่ในรูปแบบตารางกริด หรือข้อมูลแรสเตอร์ โดยมีการกำจัดความสูงของสิ่งปกคลุมพื้นผิวทางกายภาพของโลกออก (NSDI Thailand, 2555 : 1) ดังภาพประกอบ 5.2



ภาพประกอบ 5.2 การจำลองความสูงของภูมิประเทศแบบ DSM และ DEM

ที่มา : NSDI Thailand (2555 : 1)



ภาพประกอบ 5.3 ข้อแตกต่างระหว่าง DEM และ DTM

ที่มา : Robert J. Blakemore (2017 : 7)

แบบจำลองความสูงเชิงเลข

การจำลองสภาพภูมิประเทศต้องใช้ข้อมูลแบบจำลองพื้นผิวที่ต่อเนื่อง (Continuous Data) เพื่อจำลองสภาพภูมิประเทศให้แสดงระดับความสูงต่ำ การลาดเอียงของพื้นที่ ข้อมูลระดับความสูงเชิงเลขเป็นข้อมูลราสเตอร์หรือกริดที่สามารถแสดงระดับความสูงต่ำของสภาพพื้นที่จริง (สุเพชร จิรขจรกุล, 2551 : 9) มี 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองความสูงเชิงเลขและแบบจำลองภูมิประเทศเชิงเลข

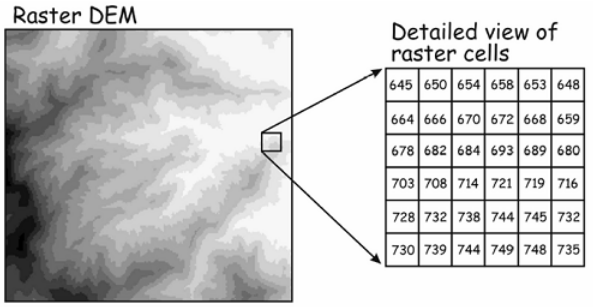
1. ความหมาย

สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (2556 : 1) ได้ให้ความหมายว่า

แบบจำลองความสูงเชิงเลข หมายถึง การแสดงความสูงต่ำของพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบข้อมูลเชิงตัวเลขระดับความสูง โดยเก็บในรูปแบบกริดหรือราสเตอร์

แบบจำลองภูมิประเทศเชิงเลข หมายถึง การแสดงสภาพความสูงของพื้นที่ โดยที่ภูมิประเทศไม่ได้หมายรวมเฉพาะระดับความสูงเท่านั้น แต่ให้รวมถึงลักษณะเฉพาะของภูมิทัศนั้น ๆ

DEM จะมีการเก็บข้อมูลความสูงอยู่ในรูปแบบของกริดหรือราสเตอร์ สามารถนำมาวิเคราะห์ เพื่อจำลองสภาพภูมิประเทศ ความลาดชัน การหันเหของความลาดชัน และข้อมูลอื่น ๆ ต่อไป หรือที่เรียกว่า DTM ดังภาพประกอบ 5.4



ภาพประกอบ 5.4 ข้อมูลราสเตอร์ระดับความสูง (Elevation Raster)
ที่มา : Humboldt State University (2017 : 2)

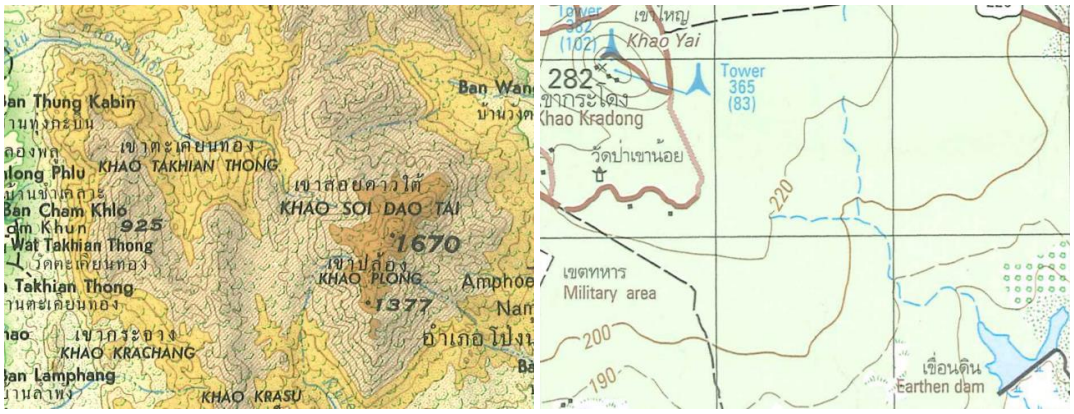
2. การแสดงข้อมูลความสูงเชิงเลข

ข้อมูลระดับสูงที่เปลี่ยนแปลงของพื้นที่ศึกษา สามารถจำลองได้หลายวิธี พื้นผิวที่แสดงสามารถใช้วิธีการได้ ดังนี้

2.1 การใช้แผ่นผิวทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Patch Method) วิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อแสดงพื้นผิวให้ตรงกับความเป็นจริง อาศัยการใช้สมการสามมิติหลายสมการต่อเนื่องกัน ซึ่งสามารถแสดงสัณฐานที่ซับซ้อนโดยมีผิวเรียบกลมกลืนกัน การใช้วิธีทำที่ละส่วนแบ่งพื้นผิวเป็นช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีเนื้อที่ใกล้เคียงกัน แล้วปรับพื้นผิวตามข้อมูลที่จุดต่าง ๆ ภายในแต่ละแผ่น ใช้สมการถ่วงน้ำหนักเพื่อให้แน่ใจว่าแผ่นต่าง ๆ ต่อกันได้พอดี แม้ว่าพื้นผิวตรงรอยต่ออาจมีการหักมุมบ้าง สมการทางคณิตศาสตร์นี้เป็นการประมาณการค่าทีละส่วนไม่เป็นที่นิยมในทางแผนที่ แต่มีตัวอย่างในการประมาณค่าที่ละส่วน เพื่อจำลองพื้นผิวที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดิน หรือคุณสมบัติของดิน หรือข้อมูลสิ่งแวดล้อมชนิดต่าง ๆ (สรรใจ กลิ่นดาว, 2555 : 360)

2.2 การแสดงข้อมูลระดับความสูงเชิงเส้นเชิงเลขด้วยภาพ

2.2.1 แบบจำลองเชิงเส้น แบบจำลองลักษณะภูมิประเทศแบบลายเส้นที่พบมากที่สุด ได้แก่ การใช้เส้นชั้นความสูง ซึ่งแสดงความสูงต่ำของภูมิประเทศ ส่วนภาพตัดขวางที่ได้จากแบบจำลองสามารถใช้ในกาวิเคราะห์ความลาดเท การสร้างแผนที่ออร์โธโฟโต้ (Orthophoto Map) เส้นชั้นความสูงจะพบในแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1 : 50,000 และ 1 : 250,000 จึงเป็นข้อมูลพื้นฐานที่พร้อมสำหรับการสร้างแบบจำลองภูมิประเทศเชิงเลข ดังภาพประกอบ 5.5

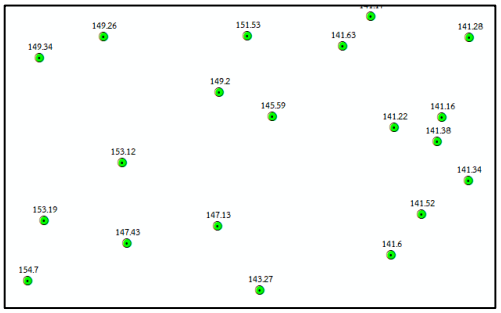


ภาพประกอบ 5.5 เส้นชั้นความสูงในแผนที่ภูมิประเทศ 1 : 50,000 และ 1 : 250,000
ที่มา : กรมแผนที่ทหาร (2516, 2543)

2.2.2 แบบจำลองแบบจุด

2.2.2.1 เมทริกซ์ระดับความสูง รูปแบบ DEM ที่พบมากที่สุด คือ เมททริกซ์ระดับสูง หรือกริดรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาดสม่ำเสมอซึ่งได้จากการอ่านค่าความสูงเป็นตัวเลขจากภาพถ่ายทางอากาศแบบสเตอริโอด้วยเครื่องวาดสเตอริโอเชิงวิเคราะห์ (Analytical Stereo-Plotters)

อีกหนึ่งวิธี คือ การสร้างเมทริกซ์ระดับความสูงโดยการประมาณค่า (Interpolation) จากข้อมูลจุดซึ่งกระจายสม่ำเสมอบนภูมิประเทศ ดังภาพประกอบ 5.6



	SPOT#	SPOT-ID	SP_ELEV
	1	1	165.89
	2	2	164.71
	3	3	154.9
	4	4	161.02
	5	5	155.12
	6	6	155.5
	7	7	161.05
	8	8	151.06

ภาพประกอบ 5.6 ข้อมูลจุดความสูง
ที่มา : ESRI (2013)

เนื่องจากข้อมูลเมทริกซ์สามารถนำมาใช้กับคอมพิวเตอร์ได้สะดวก โดยเฉพาะระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ข้อมูลแบบราสเตอร์ เมทริกซ์ระดับสูงจึงเป็นรูปแบบของ DEM ที่ใช้กันมากที่สุด สำหรับสหราชอาณาจักรและสหรัฐอเมริกา ได้มีการสร้างเมทริกซ์อย่างหยาบจากแผนที่ภูมิประเทศ มาตราส่วน 1 : 250,000 คลอบคลุมทั้งประเทศ และมีการสร้างเมทริกซ์ที่ละเอียดกว่าโดยอ่านจากแผนที่มาตราส่วน 1 : 5,000 หรือ 1 : 25,000 และภาพถ่ายทางอากาศเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในประเทศทั้งสองและประเทศอื่น ๆ เมทริกซ์ระดับสูงมีประโยชน์ช่วยในการคำนวณเส้นชั้น ความสูง องศาความลาดชันและตำแหน่งของความลาดเท การเขียนขอบเขตลุ่มน้ำอัตโนมัติ ระบบ กริดชนิดสม่ำเสมอมีข้อจำกัด (สุเพชร จิรขจรกุล, 255 : 4)ได้แก่

1) ความซ้ำซ้อนของข้อมูล มีข้อมูลที่ซ้ำซ้อนเป็นจำนวนมากในบริเวณพื้นผิวดินที่มีระดับเท่า ๆ กัน

2) ความจำกัดในการแสดรายละเอียด ด้วยขนาดของกริดที่กำหนดไม่สามารถปรับให้เหมาะสมกับบริเวณที่มีความสูงต่ำสลับซับซ้อนได้ จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของกริดก่อนจึงจะทำได้

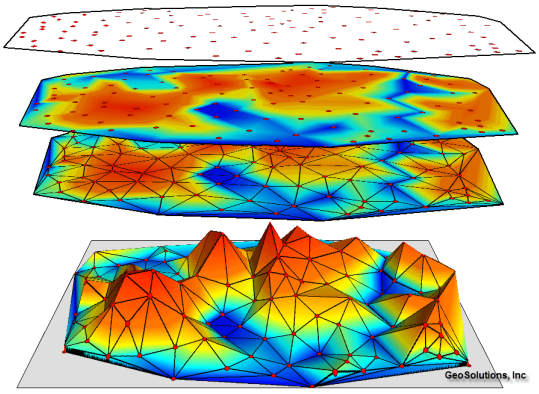
3) ความจำกัดในการคำนวณแนวมอง ด้วยข้อจำกัดที่เน้นตามแนวแกนทั้งสองของกริดมากเกินไปทำให้จำกัดการคำนวณค่าแนวมอง

ปัญหาความซ้ำซ้อนของข้อมูลจาการสุ่มตัวอย่าง อาจแก้ไขได้ด้วยวิธี การสุ่มตัวอย่างแบบก้าวหน้าด้วยการตรวจสอบแบบสเตอริโอ จะมีการเพิ่มความละเอียดของกริดอย่างอัตโนมัติตรงบริเวณที่มีความสูงต่ำซับซ้อน แต่การเก็บข้อมูลในคอมพิวเตอร์นั้นความซ้ำซ้อนข้อมูล

ก็ยังมีอยู่ เป็นเพราะพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงอย่างต่อเนื่อง ยากที่จะสร้างรหัสซึ่งสามารถเก็บในแบบอัดแน่น เช่น ใช้กับข้อมูลราสเตอร์ในการทำแผนที่โคโรเพลท เช่นเดียวกับโครงสร้างข้อมูลกริดทุกชนิด เมทริกซ์ระดับสูงอาจจะหยาบเกินไปที่จะแสดงลักษณะพื้นผิวที่อาจจะเป็นบริเวณที่มีความซับซ้อน เช่น ยอดเขา หลุม ช่องแคบ เส้นแนวเขาและทางน้ำ การแสดงรูปลักษณ์เหล่านี้อย่างไม่ตรงกับความเป็นจริงอาจก่อให้เกิดปัญหา เมื่อมีการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่วิเคราะห์เชิงปริมาณ การคำนวณทุกชนิดตามแนวที่ขนานกับเส้นกริด สามารถเรียกข้อมูลตามแถวหรือสดมภ์ได้ง่าย แต่การคำนวณตามแนวที่วางอยู่ในมุมอื่น ๆ จำเป็นต้องใช้สูตรตรีโกณมิติ เพื่อให้ได้ระยะทางและมุมที่ถูกต้อง อย่างไรก็ตามแม้จะมีข้อด้วยเหล่านี้เมทริกซ์ระดับสูงเป็นรูปแบบของ DEM ที่สร้างได้ง่ายที่สุด

ข้อมูลจุดที่กระจายอย่างไม่สม่ำเสมอสามารถใช้สร้าง DEM ได้ 2 วิธี คือ การวางแผ่น กริดที่สม่ำเสมอซ้อนบนแผ่นข้อมูลจุดแล้วใช้เทคนิคการประมาณค่า เพื่อสร้างเมทริกซ์ระดับสูง เทคนิคการประมาณค่ายังสามารถใช้ในการสร้างเมทริกซ์ที่ละเอียดจากเมทริกที่หยาบ และวิธีที่สองการใช้ข้อมูลจุดที่ไม่สม่ำเสมอเป็นฐานสำหรับการสร้างระบบงานสามเหลี่ยม (Triangulation) (สุเพชร จิรขจรกุล, 2552 : 5)

2.2.2.2 เครือข่ายสามเหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ (Triangulated Irregular Network : TIN) เป็นการจำลองเชิงเลขที่หลีกเลี่ยงปัญหาความความซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นกับเมทริกซ์ระดับความสูง และในเวลาเดียวกันยังเพิ่มประสิทธิ์ภาพให้แก่การคำนวณหลายชนิด ซึ่งดีกว่าระบบที่ใช้เพียงข้อมูลเส้นชั้นความสูงที่ดิจิไทซ์ด้วยมือ TIN เป็นแบบจำลองภูมิประเทศที่ใช้รูปสามเหลี่ยมที่โยงต่อเนื่องกัน โดยอาศัยงานสามเหลี่ยมแบบดิลาเนย์ (Delaunay) ที่สร้างจากจุด (Node) ของเส้นชั้นความสูง หรือจุดความสูงที่กระจายไม่สม่ำเสมอ ต่างจากเมทริกซ์ระดับความสูงตรงที่สามารถเพิ่มข้อสนเทศในบริเวณที่มีความสูงต่ำของพื้นผิวซับซ้อนโดยไม่จำเป็นต้องมีข้อมูลซ้ำซ้อนจำนวนมากในบริเวณที่มีความสูงต่ำไม่ซับซ้อน ผลดีคือสามารถเลือกนำเข้าข้อมูลตามแนวเขา เส้นลำธารน้ำ ลักษณะภูมิประเทศที่สำคัญอื่น ๆ โดยดิจิไทซ์ให้ถูกต้องตามต้องการ (สรรใจ กลิ่นดาว, 2555 : 361) ดังภาพประกอบ 5.7



ภาพประกอบ 5.7 เครือข่ายสามเหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ
ที่มา : Jaakko Madetoja (2017 : 11)

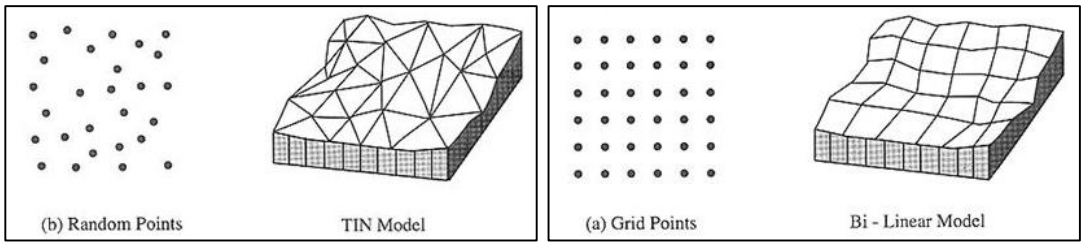
แบบจำลอง TIN มีโครงสร้างทางทอพอโลยี (Topology) แบบเวกเตอร์ คล้ายคลึงกับโครงสร้างทอพอโลยีเต็มรูปแบบที่ใช้แสดงเครือข่ายรูปสามเหลี่ยม ยกเว้นแต่ TIN ไม่มีเกาะหรือรูปแบบจำลอง TIN ถือว่าจุดของเครือข่ายเป็นเอนทิตีหลักของฐานข้อมูล ความสัมพันธ์เชิง ทอพอโลยีถูกสร้างขึ้นในฐานข้อมูลด้วยการสร้างตัวชี้จากแต่ละจุดไปยังจุดที่อยู่ข้างเคียงที่ละจุด TIN จะแสดงด้วยจุดดัมมี (Dummy node) ที่อยู่ด้านกลับกันของพื้นที่ผิวทรงกลมทางทอพอโลยี ซึ่งใช้เป็นโครงให้แก่ TIN จุดดัมมีใช้ในการสร้างทอพอโลยีให้แก่จุดตามเส้นเขตแดนและทำให้การประมวลผลง่ายขึ้น (สุเพชร จิรขจรกุล, 2552 : 1)

จากที่กล่าวมากระบวนการสร้าง TIN ซับซ้อนกว่าการสร้างชั้นข้อมูลราสเตอร์ระดับสูง (Elevation raster) จาก DEM เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามแบบจำจองข้อมูลทั้งสองแบบมีข้อดีข้อด้วยแตกต่างกัน ดังตารางที่ 5.1 การแปลงแบบจำลองข้อมูล DEM เป็นแบบจำลองข้อมูล TIN ในทางตรงกันข้ามสามารถแปลงแบบจำลองข้อมูล TIN เป็นแบบจำลอง DEM ในกระบวนการดังกล่าว แต่ละจุดระดับสูงของ DEM ต้องได้รับการประมาณค่าในช่วง (Interpolate) จากจุดต่อที่อยู่ใกล้เคียงที่ประกอบขึ้นเป็นแบบจำลอง TIN แต่ละจุดเหล่านี้ จะมีค่าพิกัด X, Y รวมทั้งระดับสูง Z เนื่องจากสมมุติให้แต่ละหน้าสามเหลี่ยมมีความลาด (Slope) และทิศทางความลาด (Aspect) คงที่ ดังนั้น การแปลงแบบจำลองข้อมูลจาก TIN เป็น DEM มีประโยชน์อย่างมากโดยเฉพาะการสร้าง DEM จากแบบจำลองข้อมูลไลดาร์ กระบวนการแรกคือ การเชื่อมต่อข้อมูลไลดาร์หรือจุดระดับสูงเพื่อให้เกิด TIN หลังจากนั้นรวบรวมข้อมูล DEM โดยการประมาณค่าในช่วงของจุดระดับสูงจาก TIN (สุเพชร จิรขจรกุล, 2552 : 2) ดังตารางที่ 5.1 และภาพประกอบ 5.8

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบแบบจำลองข้อมูล TIN และ DEM

รูปแบบข้อมูล	ข้อดี	ข้อด้อย
TIN	1. สามารถแสดงพื้นผิวที่ระดับของความละเอียดที่แตกต่างกันได้ 2. มีประสิทธิภาพในการจัดเก็บข้อมูล	ในหลาย ๆ กรณีต้องตรวจสอบและควบคุมโครงข่ายด้วยมือ
GRID DEM	1. ง่ายต่อการจัดเก็บและดำเนินการ 2. ง่ายต่อการบูรณาการฐานข้อมูลราสเตอร์	ไม่สามารถใช้กริดที่มีขนาดแตกต่าง เพื่อสะท้อนให้เห็นพื้นที่ที่มีความซับซ้อนของภูมิประเทศ

ที่มา : สรรค์ใจ กลิ่นดาว (2555 : 364)



ภาพประกอบ 5.8 การเปรียบเทียบแบบจำลองข้อมูล TIN และ DEM
ที่มา : Saiful Islam (2560 : 46)

2.3 แหล่งที่มาของข้อมูลและวิธีการสุ่มตัวอย่างสำหรับ DEM

ข้อมูลระดับความสูงเชิงเลขของพื้นผิวโลกโดยทั่วไปจะสร้างจากภาพถ่ายทางอากาศแบบสเตอริโอ โดยใช้เครื่องมือทางโฟโตแกรมเมตรีที่เหมาะสม นอกจากนี้สามารถใช้เครื่องโซนาร์ หรือเรดาร์

สุเพชร จิรขจรกุล (2552 : 11) อ้างถึงใน Makarovic (1976) แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างวิธีการสุ่มตัวอย่างทางโฟโตแกรมเมตรี สำหรับการทำ DEM หลายวิธี การสุ่มตัวอย่างแบบเลือก (Selective Sampling) คือการสุ่มตัวอย่างที่ถูกเลือกก่อนหรือระหว่างการสุ่มตัวอย่าง การสุ่มตัวอย่างแบบปรับตัว (Adaptive Sampling) คือการสุ่มตัวอย่างที่จุดตัวอย่างซ้ำซ้อนจะถูกตัดออกไประหว่างการสุ่มตัวอย่าง ด้วยเหตุผลที่ว่าจุดเหล่านี้ให้ข้อสนเทศเพิ่มเติมน้อยเกินไป การสุ่มตัวอย่างแบบก้าวหน้า (Progressive Sampling) เป็นการสุ่มตัวอย่างและวิเคราะห์ข้อมูลพร้อมกันไป ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลจะกำหนดว่าควรสุ่มตัวอย่างอย่างไร การสุ่มตัวอย่างอาจทำได้โดย

ผู้ใช้เป็นผู้ควบคุมการทำงานของเครื่องวาดแบบสเตอริโอ แต่เป็นวิธีที่ช้าและโอกาสผิดมีมาก มีการพัฒนาระบบกึ่งอัตโนมัติมาใช้เพื่อช่วยผู้ใช้เครื่องให้ทำงานเร็วขึ้นและถูกต้องมากขึ้น และถือว่าเป็นระบบที่ดีกว่าระบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบ ซึ่งแม้จะเร็วแต่มีความถูกต้องไม่สูงพอ

การสุ่มตัวอย่างมีหลายแบบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผลผลิตที่ต้องการ การสุ่มตัวอย่างแบบมุ่งประสงค์ (Purposive Sampling) ใช้เพื่อการดิจิไทซ์เส้นชั้นความสูง เส้นแสดงรูปทรง รูปตัดขวาง และเส้นรูปทรงสัณฐาน ในงานหลายประเภทนิยมใช้ DEM แบบทั่วไปที่สร้างจากเมทริกซ์ระดับสูง ดังนั้นจึงใช้การสุ่มตัวอย่างบนพื้นที่โดยใช้ตารางกริดที่สม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอได้ ในเรื่องการสุ่มตัวอย่างจุดความสูงจากภาพถ่ายทางอากาศไม่ได้แตกต่างจากเทคนิคการสุ่มตัวอย่างที่ใช้กับแหล่งข้อมูลทางพื้นที่อื่น ๆ จากการมองเห็นภาพระดับความสูงจากภาพถ่ายทางอากาศทำให้เกิดข้อได้เปรียบที่เห็นได้ชัดคือ ผู้ใช้เครื่องสามารถเห็นได้ว่าจุดตัวอย่างใดที่จะให้ข้อสนเทศที่เป็นประโยชน์หรือไม่ กริดสุ่มตัวอย่างอย่างสม่ำเสมอมีความสามารถในการปรับให้เข้ากับระดับการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวได้น้อย นพื้นผิวที่มีการเปลี่ยนแปลงต่ำอาจมีการสุ่มตัวอย่างจุดมากเกินไป และในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงมากอาจจะได้จุดตัวอย่างน้อย แต่ผู้ทำงานมีอิสระในการกำหนดจุดสังเกตตามที่ต้องการ การสุ่มตัวอย่างอาจขึ้นอยู่กับความเห็นผู้ทำงานมากทีเดียว การสุ่มตัวอย่างแบบก้าวหน้า ซึ่งเป็นวิธีการสุ่มตัวอย่างภูมิประเทศที่มีความซับซ้อนเปลี่ยนแปลงโดยไม่ขึ้นอยู่กับความเห็นส่วนตัวของผู้ทำ และสามารถทำได้อย่างอัตโนมัติในการสร้างเมทริกซ์ระดับความสูง

การสุ่มตัวอย่างแบบก้าวหน้าต้องมีการทำงานที่ต่อเนื่องกันเป็นชุด เริ่มจากกริดที่หยาบแล้วต่อด้วยกริดที่มีความหนาแน่นสูงขึ้น ความหนาแน่นของกริดจะเพิ่มขึ้นสองเท่าตัวในการสุ่มตัวอย่างครั้งถัดไป และจุดที่จะสุ่มถูกกำหนดจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสุ่มครั้งก่อนด้วยคอมพิวเตอร์ (สุเพชร จิรขจรกุล, 2552 : 12)

การวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์มีการทำงานดังนี้ เลือกแผ่วผิวรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีจุด 9 จุด บนตารางกริดที่หยาบที่สุด แล้วคำนวณความแตกต่างของความสูงระหว่างจุดที่อยู่ติดกันแต่ละคู่ตามแนวนอนและแนวตั้ง หลังจากนั้นก็คำนวณความแตกต่างระดับที่สอง (Second Differences) ซึ่งจะได้ข้อสนเทศเกี่ยวกับความโค้งของพื้นที่ภูมิประเทศ ถ้าความโค้งที่ประมาณได้สูงกว่าระดับหนึ่งที่กำหนดไว้ หมายความว่าจะต้องเพิ่มระดับความหนาแน่นของการสุ่มตัวอย่างโดยการสุ่มตัวอย่างที่กริดที่มีความหนาแน่นขึ้นในการทำงานครั้งต่อไป

การสุ่มตัวอย่างแบบก้าวหน้าใช้ได้ดีถ้าไม่มีพื้นผิวที่ผิดปกติในภาพถ่ายทางอากาศ เช่น บริเวณเมฆปกคลุมวัตถุที่มนุษย์สร้างขึ้น วิธีนี้ใช้ได้ดีที่สุดกับภูมิประเทศที่มีความสม่ำเสมอหรือกึ่งสม่ำเสมอ และมีพื้นผิวในแนวระนาบหรือเอียงเล็กน้อย หรือเป็นลูกคลื่นน้อย ๆ เท่านั้น สำหรับภูมิประเทศขรุขระปานกลาง ซึ่งมีลักษณะสัณฐานที่เด่นชัดและมีบริเวณที่ผิดจากปกตินั้นควรจะ

จัดการโดยใช้การสุ่มตัวอย่างแบบก้าวหน้าที่มีการดัดแปลงซึ่งเรียกว่า การสุ่มตัวอย่างแบบผสม (Composite Sampling) ในการสุ่มตัวอย่างแบบนี้ แนวที่มีการเปลี่ยนแปลงทางระดับอย่างทันทีทันใดในภูมิประเทศ หรือเส้นขอบของวัตถุตามธรรมชาติหรือวัตถุผิดปกติ จะถูกขีดเส้นด้วยมือก่อนจะทำการสุ่มตัวอย่างภายในพื้นที่เหล่านี้ สำหรับภูมิประเทศที่ขรุขระทีมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดหลายแห่งนั้น วิธีการสุ่มแบบก้าวหน้ากึ่งอัตโนมัติหรือแบบผสมอาจไม่มีประสิทธิภาพในการเก็บตัวอย่างได้ไม่ทั่วถึง อาจจะใช้การสุมแบบเลือก (สุเพชร จิรขจรกุล, 2552 : 13)

2.4 การปรับยึดข้อมูลและการการกำหนดรหัส

ค่าพิกัดที่ได้จากการดิจิไตทซ์ภาพถ่ายทางอากาศแบบสเตอริโอ ต้องปรับแก้ความบิดเบี้ยวที่เกิดขึ้นจากความแปรผันทางระดับความสูงขิงพื้นที่ การเอียงของเครื่องบินและอื่น ๆ ข้อมูลจะต้องปรับเข้าสู่ระบบพิกัดเดียวกัน เพื่อให้สามารถนำไปเขียนในมาตราส่วนที่ถูกต้อง และเพื่อสามารถซ้อนทับกับข้อมูลทางพื้นที่อื่น ๆ ที่อยู่บริเวณเดียวกันได้พอดี ระบบที่ใช้คือตารางกริดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดเท่า ๆ กัน ซึ่งเหมาะสำหรับพื้นที่ขนาดเล็ก ส่วนพื้นที่ขนาดใหญ่มักนิยมใช้พิกัดกริด UTM เมื่อได้กำหนดข้อมูลเข้าสู่ระบบพิกัดแล้ว สามารถปรับเปลี่ยนไปสู่ระบบพิกัดรูปแบบอื่นได้ที่เหมาะสมกับราสเตอร์ขนาดใหญ่ที่จะเป็นการทำงานที่ใช้เวลามาก (สุเพชร จิรขจรกุล, 2552 : 13)

2.5 ระดับความละเอียดของข้อมูล

ในการสร้างแบบจำลองค่าระดับสามารถกำหนดได้จากวิธีการสำรวจหลาย ๆ วิธีตามความต้องการ ความถูกต้อง ค่าใช้จ่ายและการครอบคลุมพื้นที่ที่ทำการสำรวจ ดังนั้นการทราบลักษณะของเทคโนโลยีในการวัดค่าระดับของพื้นที่ที่ต้องการ เพื่อสร้างแบบจำลองค่าระดับจะทำให้การทำงานสามารถเลือกวิธีการที่เหมาะสมและลักษณะของข้อมูลระดับในการไปสร้างแบบจำลองค่าระดับได้อย่างเหมาะสม โดยการรังวัดข้อมูลระดับจะจำแนกได้เป็น 3 กลุ่ม (วิชัย เย่ียงวีรชน, 2549 : 7) ดังนี้

2.5.1 การรังวัดภาคพื้นดิน (Terrestrial Survey) การสำรวจภาคพื้นดินจึงเป็นการกำหนดตำแหน่งขิงพื้นผิวภูมิประเทศบนโลก ด้วยกล้องธีโอไลท์หรือกล้องประมวลผลรวมและกล้องระดับในการสำรวจพื้นดินให้ได้ค่าพิกัดและค่าระดับสำหรับบอกตำแหน่งและค่าความสูงของพื้นดิน ขอบเขตของการทำงานจำกัดในระดับท้องถิ่น (ธีระ ลาภิศชยางกูล, 2549 : 2) แต่ปัจจุบันได้ใช้เครื่องกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลกด้วยดาวเทียมในการหาค่าพิกัดของพื้นดินจึงทำให้การทำงานรวดเร็วเพิ่มขึ้นเพราะได้ค่าระดับของพื้นดินในสนามจากวิธีการทำงานแบบจลน์ทันทีทันใด ที่ใช้เวลาในการทำงานแต่ละจุดภายใน10-30 วินาที (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2555 : 1) เนื่องจากการ

สำรวจประเภทนี้ผู้สำรวจต้องทำการสำรวจในพื้นที่โดยตรงจึงทำให้ใช้เวลาในการทำงานนานและละเอียดถูกต้องของงานที่ได้สูงอยู่ในระดับเซนติเมตร (วิชัย เยี่ยงวีรชน, 2549 : 7)

2.5.2 การรังวัดด้วยภาพ (Image Survey) เป็นการสำรวจด้วยการนำภาพถ่ายในการทำแผนที่ ซึ่งภาพประกอบใช้ก็คือ ภาพถ่ายทางอากาศหรือภาพถ่ายดาวเทียม ซึ่งการสำรวจด้วยภาพนี้มีความสะดวกที่ไม่ต้องเข้าถึงพื้นที่ที่ทำการสำรวจ แต่ก็จำกัดด้วยเครื่องมือและวิธีการประมวลผลที่ซับซ้อนจึงต้องใช้ผู้ที่มีความชำนาญในการทำงาน ส่วนความละเอียดถูกต้องจากการสำรวจด้วยภาพถ่ายทางอากาศจะมีค่าในระดับเดซิเมตรถึงเมตร (ธีระ ลาภิศชยางกูล, 2549) ในปัจจุบันภาพถ่ายจากดาวเทียมที่มีความละเอียดสูงมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นทำให้การทำงานด้วยภาพดาวเทียมจึงเป็นที่นิยมและครอบคลุมพื้นที่ในระดับโลก ซึ่งสามารถถ่ายบริเวณใดก็ได้ตามต้องการ (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2555 : 2)

2.5.3 การรังวัดด้วยเรดาห์หรือเลเซอร์ (Radar or Laser Scanner) เป็นการสำรวจประเภทหนึ่งของการสำรวจระยะไกลในการที่ใช้เครื่องเรดาห์หรือเลเซอร์ในการส่งสัญญาณโดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากธรรมชาติหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อสร้างพื้นผิวภูมิประเทศ การถ่ายภาพด้วยระบบเลเซอร์ถ้าใช้บนเครื่องบินจะเรียกว่า เครื่องกวาดภาพระบบเรเซอร์ทางอากาศ ส่วนบนดาวเทียมจะเรียกว่า ระบบนำแสงตรวจจับและจัดการ ในปัจจุบันทางด้านเชิงพาณิชย์จึงมีการพัฒนาและปรับปรุงทั้งสองระบบคือ ระบบเครื่องกวาดภาพระบบเรเซอร์ทางอากาศและระบบนำแสงตรวจจับและจัดการ (ธีระ ลาภิศชยางกูล, 2549 : 3) อีกทั้งเมื่อใช้ร่วมกับระบบบอกตำแหน่งพิกัดบนพื้นโลกด้วยดาวเทียมจีพีเอส ทำให้การสำรวจด้วยเลเซอร์สามารถสร้างรูปแผนที่และพื้นผิว โดยที่ความถูกต้องของค่าระดับจะอยู่ในช่วง 10–20 เซนติเมตร ส่วนการสำรวจด้วยเรดาห์ความถูกต้องของค่าระดับจะอยู่ในช่วง 10–25 เมตร ดังตารางประกอบ 5.2

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบวิธีการรังวัดหาค่าความสูง

Source	Resolution (m)	Accuracy	Footprint (km^2)	Post-processing requirements	Elevation/surface
Ground survey	Variable but usually <5 m	Very high vertical and horizontal	Variable, but usually small	Low	Elevation
GPS	Variable but usually <5 m	Medium vertical and horizontal	Variable, but usually small	Low	Elevation
Table digitizing	Depends on map scale and contour interval	Medium vertical and horizontal	Depends on map footprint	Medium	Elevation
On-screen digitizing	Depends on map scale and contour interval	Medium vertical and horizontal	Depends on map footprint	Medium	Elevation
Scanned topo-map	Depends on map scale and contour interval	Medium vertical and horizontal	Depends on map footprint	High	Elevation
Ortho-photography	<1	Very high vertical and horizontal	–	High	Surface
LiDAR	1–3	0.15–1 m vertical, 1 m horizontal	30–50/h	High	Surface
InSAR/IfSAR	2.5–5	1–2 m vertical, 2.5–10 m horizontal	Depends on method of acquisition	High	Surface
SRTM, Band C	90 (30)	16 m vertical, 20 m horizontal	Almost global, 60° N to 58° S	Potentially high	Surface
SRTM, Band X	30	16 m vertical, 6 m horizontal	Similar to B and C, but only every second path is available	Potentially high	Surface
ASTER	30	7–50 m vertical, 7–50 m horizontal	3600	Medium	Surface
SPOT	30	10 m vertical, 15 m horizontal	72,000 per swath	Medium	Surface

ที่มา : กรมแผนที่ทหาร (2560 : 4)

2.6 ประโยชน์ของแบบจำลองความสูงเชิงเลข สามารถประยุกต์ใช้ในหลายสาขา (สุเพชร จิรขจรกุล, 2552 : 14)

2.6.1 การทำแผนที่ภูมิประเทศ จัดทำฐานข้อมูลระดับความสูงต่ำของพื้นที่ในฐานข้อมูลระดับชาติ

2.6.2 การวางแผนด้านวิศวกรรมการทาง วิเคราะห์การขุดหรือถมพื้นที่เพื่อประกอบการออกแบบถนน เพื่อวางผังเส้นทางถนนหรือวิศวกรรมการทาง

2.6.3 การวางแผนด้านวิศวกรรมโยธา เพื่อกำหนดตำแหน่งของเขื่อนและโครงสร้างวิศวกรรมโยธา

2.6.4 การแสดงภูมิลักษณ์ แสดงเป็นสามมิติเพื่อวัตถุประสงค์ทางทหารในการนำทาง ระบบนำวิถีทางอาวุธ และการออกแบบ วางผังของภูมิทัศน์

2.6.5 การแสดงภาพตัดขวางภูมิประเทศ เพื่อวิเคราะห์ทัศนวิสัย ตามแนวตัดขวางภูมิประเทศ

2.6.6 การวิเคราะห์เชิงพื้นที่ เพื่อการคำนวณในการทำแผนที่แสดงความลาดชัน แผนที่แสดงความหันเหของความลาดเอียง ภาพตัดขวางของความลาดเท สามารถนำไปสร้างแผนที่ความสูงเชิงเงา เพื่อช่วยในการศึกษาธรณีสัณฐาน วิเคราะห์ทางอุทกวิทยา ปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน การประมาณอัตราการพังทลายของดิน

2.6.7 การแสดงแผนที่ความสูงเชิงเงา เป็นพื้นหลังสำหรับการแสดงข้อสนเทศเฉพาะเรื่อง หรือสำหรับแสดงข้อมูลความสูงต่ำร่วมกับข้อมูลเฉพาะเรื่องอื่น ๆ เช่น ดิน การใช้ประโยชน์ที่ดินและพืชพรรณ เป็นต้น

2.6.8 การแสดงแผนที่สามมิติ เพื่อการวิเคราะห์ทางสถิติและการเปรียบเทียบลักษณะภูมิประเทศ

สรุป

ข้อมูลความสูงภูมิประเทศ สามารถแบ่งออกเป็น Digital Surface Model จัดเก็บให้อยู่ในรูปแบบตารางกริด โดยรวมความสูงของสิ่งปกคลุมพื้นผิวทางกายภาพของโลกด้วย และ Digital Terrain Model หรือ Digital Elevation Model จัดเก็บให้อยู่ในรูปแบบตารางกริด โดยมีการกำจัดความสูงของสิ่งปกคลุมพื้นผิวทางกายภาพของโลกออก ในการจำลองข้อมูลความสูงเชิงเลขสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การใช้แผ่นผิวทางคณิตศาสตร์ การแสดงข้อมูลระดับความสูงเชิงเส้นเชิงเลขด้วยภาพ ระดับความละเอียดของข้อมูลจำแนกโดยการรังวัดได้เป็น 3 กลุ่ม การรังวัดภาคพื้นดิน การรังวัดด้วยภาพและการรังวัดด้วยเรดาห์หรือเลเซอร์ การนำไปใช้ประโยชน์สามารถปรับใช้ตามความเหมาะสมของงาน เช่น การทำแผนที่ภูมิประเทศ การวางแผนด้านวิศวกรรมการทาง การวางแผนด้านวิศวกรรมโยธา การแสดงภูมิลักษณ์ การแสดงภาพตัดขวางภูมิประเทศ การวิเคราะห์เชิงพื้นที่ การแสดงแผนที่ความสูงเชิงเงา การแสดงแผนที่สามมิติ แต่ต้องคำนึงถึงข้อจำกัดและระดับความละเอียดของข้อมูลด้วย

เอกสารอ้างอิง

กรมแผนที่ทหาร. (2516). **แผนที่ภูมิประเทศ 1:250,000**. กรุงเทพมหานคร : กรมแผนที่ทหาร.

_____. (2543). **แผนที่ภูมิประเทศ 1:50,000**. กรุงเทพมหานคร : กรมแผนที่ทหาร.

_____. (2560). **การใช้โปรแกรมภูมิสารสนเทศในการสร้างแบบจำลองความสูงสามมิติของภูมิประเทศ**. เข้าถึงเมื่อ 14 พฤษภาคม 2560 จาก https://www.rtsd.mi.th/main/2015/04/25/การใช้โปรแกรมภูมิสารสน

ธีระ ลาภิศชยางกูล. (2549). **การรังวัดค่าระดับ.** กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ไพศาล สันติธรรมนนท์. (2555). **การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล.** กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิชัย เย่ียงวีรชน. (2549). **การสำรวจรังวัด ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้.** กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สรรค์ใจ กลิ่นดาว. (2555). **แนวคิดและวิธีการจัดการข้อมูลเชิงพื้นที่.** กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ. (2556). การเผยแพร่และบริการข้อมูลภูมิสารสนเทศพื้นฐานชั้นความสูงภูมิประเทศ. เข้าถึงเมื่อ 20 เมษายน 2560, จาก https://sites.google.com/site/lidardemservice/home

สุเพชร จิรขจรกุล. (2551). เรียนรู้ระบบภูมิสารสนเทศด้วยโปรแกรม ArcGIS Desktop 9.2. นนทบุรี. เอสอาร์ พริ้นติ้งแมสโปรดักส์ จำกัด.

ESRI. (2013). **ArcGIS Desktop.** สหรัฐอเมริกา : อีเอสอาร์ไอ (ประเทศไทย) จำกัด.

Humboldt State University. (2017). **Rasters are digital photos**. เข้าถึงเมื่อ 10 เมษายน 2560 จาก http://gis.humboldt.edu/olm/Lessons/GIS/04%20CreatingSpatialData/RasterDataModels3.html

Jaakko Madetoja. (2017). **Geostatistics: Interpolation and Kriging**. เข้าถึงเมื่อ 25 พฤษภาคม 2560 จากhttp://www.edc.uri.edu/nrs/classes/nrs409509/Lectures/8Models/ models.htm

NSDI Thailand. (2555). **ข้อมูลภูมิสารสนเทศพื้นฐานชั้นความสูงภูมิประเทศ.** เข้าถึงเมื่อ 25 มีนาคม 2560 จาก แหล่งที่ มา : https://sites.google.com/site/lidardemservice/ khwam-hmay-khxng-khxmul-khwam-sung-phumiprathes-thi-hi-brikar

Patiwat Littidej. (2559). การวิเคราะห์ภูมิประเทศ**.** มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Robert J. Blakemore. (2017). **Non-Flat Earth Recalibrated for Terrain and Topsoi**. เข้าถึงเมื่อ 15 July 2017 จาก https://www.google.co.th/url?sa=i&source=imgres&cd=&ved=2ahUKEwisk5X4ipDfAhXEpo8KHYEjBH8Qjhx6BAgBEAI&url=https%3A%2F%2Fwww.mdpi.com%2F2571-8789%2F2%2F4%2F64%2Fpdf&psig=AOvVaw226F1DyXt-gpLjfhEE-GMO&ust=1544353417085662

Saiful Islam. (n.d.). **Digital Terrain Mapping and Analysis**. เข้าถึงเมื่อ 25 พฤษภาคม 2560 จาก http://slideplayer.com/slide/5153395/