

การศึกษาเปรียบเทียบวิธีแบบความน่าจะเป็นได้สูงที่สุด กับ วิธีแบบซัพพอร์ต
เวกเตอร์แมชชีนในการวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat
เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในเมืองขอนแก่น

**A Comparative Study of Applying Maximum Likelihood and Support Vector
Machine Classifiers to Analyze Landsat Imagery for Evaluating Land Use
Changes in Khon Kaen City, Thailand**

ทรัน วัน นินห์ (Tran Van Ninh)* ดร.ชาตติชชา ไวยสุระสิงห์ (Dr.Chattichai Waisurasingha)^{1**}

บทคัดย่อ

งานศึกษาวิจัยนี้มีความมุ่งหมายที่จะเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวจำแนกระหว่างวิธีแบบความน่าจะเป็นได้สูงที่สุด (Maximum Likelihood Classifier, [MLC]) กับ วิธีแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine Classifier, [SVMC]) สำหรับการจำแนกข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat เพื่อการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ซึ่งมักจะเผชิญอยู่กับสภาวะจำนวนพื้นที่ตัวอย่าง (training area) ของภาพถ่ายของพื้นที่ของปืดดินในช่วง 10-20 ปีก่อนที่มีอยู่อย่างค่อนข้างจำกัดและมีจำนวนน้อย โดยอาศัยเมืองขอนแก่น ในช่วงปี พ.ศ.2533-2558 เป็นกรณีศึกษา ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมแลนด์แซทหลายช่วงเวลา เพื่อจำแนกการใช้ที่ดินออกเป็น 5 ประเภทดังนี้ พื้นที่ชุมชน (built-up area, [BU]) พื้นที่เกษตร (agriculture, [AG]) แหล่งน้ำ (water body, [WA]) พื้นที่ผสม (mixed-range land, [MX]) และพื้นที่ว่างเปล่า (bare land, [BA]) ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า SVMC ยังคงทำงานได้ดีกว่า MLC โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปี พ.ศ.2533 และ พ.ศ.2542 โดย SVMC แสดงประสิทธิภาพสูงกว่า MLC ดังจะเห็นได้จากค่า kappa index 0.9 ของ SVMC ที่ดีกว่า 0.5 ของ MLC อย่างมีนัยสำคัญ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าวิธี SVMC นั้นสามารถนำมาใช้จำแนกข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมของปืดดินที่จำนวนพื้นที่ตัวอย่างมีอยู่ค่อนข้างจำกัดได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพ

ABSTRACT

This study aims to compare the accuracy of Maximum Likelihood Classifier (MLC) and Support Vector Machine Classifier (SVMC) in land-use change analysis, dealing with a limited and small number of training sample areas for using to classify satellite imagery of last ten and twenty years ago. By taking Khon Kaen city as an example, we used these two classifiers to analyze Landsat imagery of Khon Kaen city during 1990-2015 into five classes built-up area (BU), agriculture (AG), water body (WA), mixed-range land (MX) and bare land (BA) then compared the overall accuracy and kappa index. The comparison result shows that with the same number of training sample, SVMC still perform better than MLC, especially for year 1990 and 1999, SVMC outperform the MLC in term of kappa index of 0.9 for SVMC which is better than 0.5 for MLC, significantly. These results show that with a limited and small number of training samples for past year data, SVMC can be used to produce a powerful thematic map, efficiently.

คำสำคัญ: การขยายตัวของเมือง การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุม ตัวจำแนกแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

Keywords: Urban expansion, Land use/cover changes, Support Vector Machine Classifier

¹Correspondent author: chattichai@gmail.com

* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



บทนำ

ในปัจจุบันที่ประเทศไทยที่กำลังขับเคลื่อนโมเดลพัฒนาเศรษฐกิจใหม่ที่เรียกว่า “ไทยแลนด์ 4.0” ภายใต้หลักคิดในการนำพาประเทศไทยไปด้วยนวัตกรรมอันนำมาซึ่งการพัฒนาความเป็นอัจฉริยะภาพ (smart) ในทุกมิติ และหนึ่งในนั้นคือ ความเป็นเมืองอัจฉริยะ (smart city) ที่ต้องมีการพัฒนาเมืองโดยเป็นการปรับปรุงคุณภาพชีวิต เศรษฐกิจและสังคม โดยการพัฒนาเมืองเหล่านี้จำเป็นต้องมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานต่างๆของเมืองไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาเส้นทางขนส่งระบบราง การพัฒนาเส้นโครงข่ายด้านการจราจร และการพัฒนาสาธารณูปโภคพื้นฐานต่างๆ ขึ้นมารองรับการเติบโตและการใช้พลังงานของเมืองให้เกิดประโยชน์สูงสุด อันจะนำมาซึ่งการลดการเกิดก๊าซเรือนกระจกที่ช่วยให้เกิดการปรับตัวและพัฒนาคุณภาพของเมืองไปในที่สุด โดยเหตุนี้เอง การศึกษาทิศทาง การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินเพื่อให้เกิดการวางแผน การใช้ประโยชน์และการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติอย่างเหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็น [1-2] จากการศึกษาในอดีต ได้มีการประยุกต์ใช้งานสำรวจระยะไกล (remote sensing) ร่วมกับระบบภูมิสารสนเทศ (geographic information systems, [GIS]) เพื่อการวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดินในแต่ละช่วงเวลา เช่น [3] ได้นำเอาข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat หลายช่วงเวลา มาวิเคราะห์การขยายตัวในระหว่างปี ค.ศ. 1976-2000 (25 ปี) ของเมืองไนโรบี (Nairobi) ประเทศเคนยา (Kenya) ซึ่งเป็นเมืองสำคัญทางเศรษฐกิจของทวีปแอฟริกา และในเวลาต่อมา [4] ได้นำภาพถ่ายดาวเทียมแลนด์แซท หลายช่วงเวลา โดยเป็นข้อมูลระหว่างปี ค.ศ. 1973-2000 (28 ปี) มาใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินในเขตเมืองบิन्दูรา (Bindura) ประเทศซิมบับเว (Zimbabwe) ซึ่งเป็นเมืองกสิกรรมและแหล่งแร่ทองคำที่สำคัญของภูมิภาคแอฟริกาตะวันออก และสำหรับภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [5] ได้นำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมแลนด์แซท ปี ค.ศ. 1989-2006 มาดูการเติบโตของนครโฮจิมินห์ ประเทศเวียดนาม ซึ่งเป็นเมืองที่มีการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับเมืองอื่นในภูมิภาคเดียวกัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการดูการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของนครโฮจิมินห์ โดยการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินเหล่านี้เป็นสิ่งจำเป็นที่ส่งผลโดยตรงต่อการวางแผนการใช้ที่ดินอย่างชาญฉลาด (smart utilization of land) ซึ่งมีผลอย่างยิ่งต่อการก้าวไปสู่ความเป็นนครอัจฉริยะ (smart city) จากการศึกษาวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมา จะเห็นว่าข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมแลนด์แซท หลายช่วงเวลาได้ให้ผลการศึกษาที่ดีในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน/สิ่งปกคลุมดิน (land use/cover change analysis) ของเมืองสำคัญที่กำลังพัฒนาโดยได้แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาและขับเคลื่อนเมืองได้อย่างชัดเจน และสำหรับเมืองขอนแก่นซึ่งจัดเป็นเมืองที่มีความสำคัญทางด้านการเงินและเศรษฐกิจของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตลอดจนเป็นศูนย์กลางทางการศึกษา การแพทย์และการคมนาคมของภูมิภาคอินโดจีน ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมานี้ ได้เลือกใช้ตัวจำแนก (classifier) การใช้ประโยชน์ที่ดินแบบความน่าจะเป็นได้สูงสุด (Maximum Likelihood, [ML]) ซึ่งต้องอาศัยจำนวนตัวอย่างจำนวนมากในการจำแนก โดยที่ผ่านวิธีการนี้เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมสูงสุด แต่มีข้อจำกัดในประเด็นของจำนวนตัวอย่างที่ใช้เป็นพื้นที่ตัวอย่าง (training area) ที่ต้องการจำนวนมากและถือเป็นข้อจำกัดที่สำคัญสำหรับการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินในอดีต ทั้งนี้เพราะการจำแนกการใช้ที่ดินในอดีตจำเป็นต้องมีกระบวนการย้อนรอยเพื่อเก็บพื้นที่ตัวอย่าง (training area) ส่งผลให้ปริมาณพื้นที่ที่จะถูกนำมาใช้เพื่อเป็นตัวอย่างมีปริมาณค่อนข้างจำกัด แต่ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา [6] ได้มีการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ด้วยเครื่องกล (machine learning) ผ่านตัวจำแนกแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine, [SVM]) มาใช้ในการจำแนกข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ส่งผลให้สามารถจำแนกข้อมูลได้แม้จำนวนพื้นที่ตัวอย่างมีอยู่ค่อนข้างจำกัดได้เป็นอย่างดี โดยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาเปรียบเทียบความถูกต้องในการจำแนกการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินด้วยวิธีแบบความน่าจะเป็นได้สูงสุดซึ่งเป็นวิธีการดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการจำแนกด้วยวิธี

แบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนซึ่งเป็นวิธีการจำแนกที่ใช้จำนวนพื้นที่ตัวอย่างน้อยในเขตเมืองขอนแก่นที่มีการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินอย่างรวดเร็วในช่วง 2 ทศวรรษที่ผ่านมา

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวจำแนกระหว่างวิธีแบบความน่าจะเป็นได้สูงสุด (Maximum Likelihood Classifier, [MLC]) กับ วิธีแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine Classifier, [SVMC]) ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน สิ่งปกคลุมดินและการขยายตัวของเมืองขอนแก่นในช่วงระยะเวลา 25 ปีที่ผ่านมา (ปี พ.ศ.2533-2558) โดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียมแลนด์แซทหลายช่วงเวลา

วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การจำแนกประเภทการใช้ที่ดินด้วยข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม

ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงนำช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวมาใช้ในการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินในบริเวณเมืองขอนแก่นซึ่งจะประกอบไปด้วย พื้นที่แหล่งชุมชน พื้นที่การเกษตร พื้นที่ผสม พื้นที่ว่างเปล่า และแหล่งน้ำ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. พื้นที่แหล่งชุมชน (built-up area, [BU]) คือ บริเวณที่มนุษย์สร้างขึ้นเช่น สิ่งปลูกสร้าง ที่พักอาศัย และอาคารบ้านเรือน เป็นต้น
2. พื้นที่การเกษตร (agriculture, [AG]) คือ บริเวณพื้นที่ที่มีการเพาะปลูกทำการเกษตรเช่น ข้าวนาปี ข้าวนาปรัง เป็นต้น
3. แหล่งน้ำ (water body, [WA]) คือ บริเวณที่เป็นผิวน้ำ เช่น แม่น้ำ อ่างเก็บน้ำ บึงหนองหรือรวมไปถึงบริเวณน้ำท่วม
4. พื้นที่ผสม (mixed-range land, [MX]) คือ บริเวณที่มีการกระจายตัวอย่างเบาบางของต้นไม้ขนาดเล็ก รวมถึงพื้นที่หญ้า หรือเป็นการใช้ที่ดินหลายประเภทไม่สามารถแยกประเภทการใช้ที่ดินได้อย่างชัดเจน
5. พื้นที่ว่างเปล่า (bare land, [BA]) คือ บริเวณพื้นที่โล่งหรือพื้นที่ว่างเปล่า แต่อาจจะมีหญ้าปกคลุมเล็กน้อย

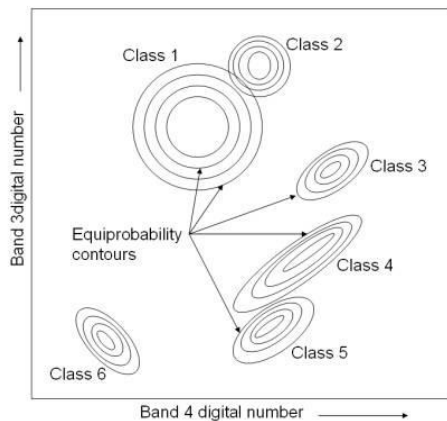
การจำแนกประเภทข้อมูลแบบควบคุม

ในการจำแนกประเภทแบบควบคุม (supervised classification) เอกลักษณ์ของแต่ละพื้นที่และการใช้ประโยชน์ที่ดิน เช่น เมือง พื้นที่การเกษตร พื้นที่ชุ่มน้ำ เราสามารถทราบได้จากการสำรวจภาคสนาม การแปลตีความจากภาพถ่ายทางอากาศ การวิเคราะห์แผนที่ และประสบการณ์ของแต่ละบุคคล ดังนั้นเราสามารถกำหนดตัวอย่างข้อมูลที่เรารวบรวมในแต่ละประเภทบนสิ่งปกคลุมดินได้ และเรียกว่า “พื้นที่ตัวอย่าง (training sample)” การสะท้อนเชิงสเปกตรัมที่แตกต่างกันของแต่ละพื้นที่ทำให้สามารถจำแนกการใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินได้ แล้วจึงทำการนำค่าการสะท้อนเชิงสเปกตรัมของพื้นที่ตัวอย่างมาใช้ในการจัดกลุ่มผ่านตัวจำแนกแบบต่างๆ ซึ่งในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เน้นไปที่ตัวจำแนก 2 ตัวต่อไปนี้ คือ

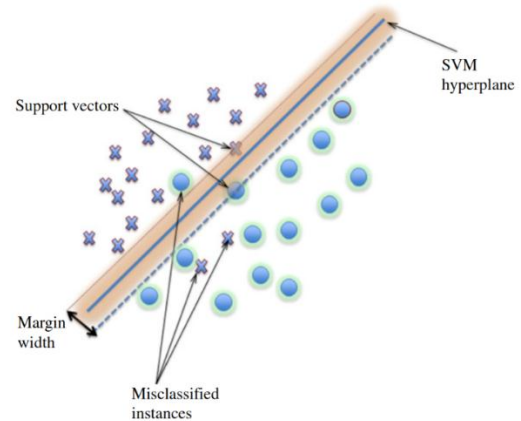
- ก) ตัวจำแนกแบบความน่าจะเป็นได้สูงสุด (Maximum Likelihood Classifier, [MLC]) ที่ใช้ค่าการสะท้อนในแต่ละแบนด์ของพื้นที่ตัวอย่างมาวิเคราะห์ตัวแปรทางสถิติ เช่น ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเมตริกซ์ความแปรปรวน เพื่อที่จะใช้เป็นเกณฑ์ในการประเมินและจัดกลุ่มทุกจุดภาพของข้อมูล โดยอาศัยหลักความน่าจะเป็นดังภาพที่ 1 (ก) ซึ่งถ้าจุดภาพไปอยู่ในพื้นที่ความน่าจะเป็นของกลุ่มหรือคลาสใดสูงที่สุด ก็จะถูกรวบรวมให้เข้าไปในกลุ่มหรือคลาสนั้น วิธีจำแนกประเภทนี้มีข้อดี เมื่อมองจากทฤษฎีความน่าจะเป็น แต่อย่างไรก็ตาม มีหลายจุดที่จะต้องระวัง ต้องทำการ



สำรวจภาคพื้นดินให้มาก เพื่อจะได้ข้อมูลเพียงพอที่จะประมาณค่าเวกเตอร์เฉลี่ย และเมตริกซ์ความแปรปรวน – ความแปรปรวนร่วมของประชากร เมตริกซ์ผกผันของเมตริกซ์ความแปรปรวน – ความแปรปรวนร่วมจะไม่เสถียร ถ้าหากมีสหสัมพันธ์ระหว่าง 2 แบนด์สูงมาก หรือข้อมูลที่ได้จากการสำรวจข้อมูลภาคพื้นดินมีลักษณะเป็นเอกพันธ์มาก ในกรณีนี้ต้องลดจำนวนแบนด์ลง โดยใช้วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก ถ้าหากการแจกแจงของประชากรไม่เป็นการแจกแจงแบบปกติ ไม่ควรใช้การจำแนกประเภทนี้ [7]



(ก)



(ข)

ภาพที่ 1 (ก) หลักการจำแนกประเภทแบบความน่าจะเป็นสูงสุด คัดแปลงจาก [7]

(ข) หลักการจำแนกประเภทแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน คัดแปลงจาก [6]

ข) ตัวจำแนกแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machines Classifier, [SVMC]) เป็นการจำแนกข้อมูลแบบไม่ได้อาศัยพารามิเตอร์ทางสถิติ (non-parametric statistical) ดังนั้น การจำแนกด้วยวิธีนี้จึงไม่ได้อาศัยรากฐานของการกระจายตัวของข้อมูล (data distribution) มาเป็นหลักในการคิด โดยเหตุนี้ การประยุกต์ใช้เทคนิคการจำแนกด้วยวิธีซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนที่สามารถจำแนกข้อมูลได้แม้จำนวนพื้นที่ตัวอย่างมีอยู่ค่อนข้างจำกัด โดยการจำแนกด้วยวิธีนี้จะได้อาศัยข้อมูลที่มีอยู่อย่างค่อนข้างจำกัดนั้นในการสร้าง hyperplane เพื่อช่วยในการจำแนกข้อมูล โดยวิธี SVMC นี้ต้องอาศัยฟังก์ชันแกน (kernel function) ทั้งนี้ kernel function ที่ได้รับความนิยมสูงที่สุดซึ่งนำมาใช้ในการศึกษานี้คือ linear kernel [6] ที่อาศัยการแบ่งกลุ่มด้วยเส้นตรงดังภาพที่ 1 (ข)

การประเมินความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพดาวเทียม

การประเมินความถูกต้องของการจำแนกประเภทจำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่ใช้สำหรับอ้างอิงในการตรวจสอบความถูกต้อง ข้อมูลที่ได้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะได้อาจจากการสำรวจภาคสนามหรือจากภาพถ่ายทางอากาศที่มีเวลาใกล้เคียงกันกับภาพดาวเทียม [9] โดยองค์ประกอบพร้อมด้วยรายละเอียดสามารถอธิบายได้ดังนี้

ก) ข้อมูลอ้างอิงเปรียบเทียบ (reference data)

ในการประเมินความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพดาวเทียม จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีข้อมูลมาใช้อ้างอิงในการตรวจสอบความถูกต้อง ข้อมูลที่ใช้อ้างอิงอาจจะได้มาจาก 2 แหล่งที่มา คือ

1. ภาพถ่ายทางอากาศ (aerial photography) จะถ่ายภาพของรายละเอียดบนพื้นผิวภูมิประเทศ เพื่อตรวจสอบว่าการจำแนกข้อมูลภาพดาวเทียมนั้นมีความใกล้เคียงกับภาพถ่ายทางอากาศมากน้อยเพียงใด

2. การเก็บข้อมูลภาคสนาม (ground truth data) การเก็บข้อมูลจะสุ่มเก็บในแต่ละจุดในพื้นที่ศึกษา เพื่อใช้อ้างอิงในการตรวจสอบการประเมินความถูกต้องของภาพถ่ายเทียม การสุ่มเลือกตัวอย่างควรทำอย่างน้อย 50 จุด ในแต่ละประเภทชุดข้อมูล [10] แต่อย่างไรก็ตาม บางประเภทข้อมูลพื้นที่ที่น้อยมาก จึงทำให้จำนวนจุดตรวจสอบแม้จะกระจายทั่วทั้งพื้นที่ศึกษาก็ไม่สามารถมีจำนวนจุดตรวจสอบเกินกว่า 50 จุดได้ และจากการศึกษางานวิจัย [3] ได้ตรวจสอบแผนที่เมืองในโรบี ประเทศเคนย่า โดยมีขนาดพื้นที่ศึกษาทั้งหมด 713 ตารางกิโลเมตร โดยสุ่มเก็บตัวอย่างทั้งหมด 482 จุด ซึ่งคิดเป็นจำนวนประมาณ 7 จุด ต่อ 10 ตารางกิโลเมตร ดังนั้น สำหรับบางประเภทการใช้ที่ดินที่มีขนาดพื้นที่ไม่มากนักที่ไม่สามารถเก็บตัวอย่างได้ถึง 50 จุด จึงจะใช้เกณฑ์การพิจารณาต่อขนาดของพื้นที่ในลักษณะเดียวกันกับของ [3] ดังนั้นการเก็บตัวอย่างแต่ละประเภทการใช้ที่ดินจึงไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับปริมาณและความเหมาะสมของประเภทการใช้ที่ดินบริเวณพื้นที่ศึกษาด้วย

ข) เมตริกซ์ความคลาดเคลื่อน (error matrix)

การสร้างตารางเมตริกซ์ความคลาดเคลื่อนดังภาพที่ 2 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอ้างอิงที่มีกับผลที่ได้จากการจำแนกประเภทให้ตรงกัน โดยข้อมูลที่ได้จากการจำแนกประเภทจะจัดให้อยู่ในหลัก (columns) ของตารางและข้อมูลที่ใช้อ้างอิงจะจัดให้อยู่ในแถว (rows) ของเมตริกซ์ความคลาดเคลื่อน [7-9] ในการสร้างตารางเมตริกซ์ความคลาดเคลื่อนสามารถหาค่าความถูกต้องโดยรวม (overall accuracy) ความถูกต้องของผู้ใช้ (user's accuracy) ความถูกต้องของผู้ผลิตแผนที่ (producer's accuracy) และค่า kappa index ความถูกต้องของผู้ใช้ (user's accuracy) สามารถคำนวณได้จากตัวเลขที่ได้จากจุดภาพการจำแนกประเภทในแต่ละกลุ่มหารด้วยค่าทั้งหมดของจุดภาพของการจำแนกประเภทในแถวนั้น (ผลรวมในแถว) $\frac{X_{ii}}{X_{i+}}$ และความถูกต้องของผู้ผลิตแผนที่ (producer's accuracy) สามารถคำนวณได้จากตัวเลขที่ได้จากจุดภาพการจำแนกประเภทในแต่ละกลุ่มหารด้วยค่าทั้งหมดของจุดภาพของการจำแนกประเภทในคอลัมน์นั้น (ผลรวมในคอลัมน์) $\frac{X_{ii}}{X_{+i}}$

		j = Columns (Reference)			Row Total
		1	2	r	X_{i+}
i = Rows (Classification)	1	X_{11}	X_{12}	X_{1k}	X_{1+}
	2	X_{21}	X_{22}	X_{2k}	X_{2+}
	r	X_{k1}	X_{k2}	X_{kk}	X_{k+}
Column Total X_{+i}		X_{+1}	X_{+2}	X_{+3}	X_{+4}

ภาพที่ 2 ตัวอย่างการสร้างตารางเมตริกซ์ความคลาดเคลื่อน ดัดแปลงจาก [8]

ค) ค่า overall accuracy และ kappa index

การวิเคราะห์ค่า overall accuracy และ kappa จะถูกใช้ในการประเมินความถูกต้องของการจำแนกประเภท ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ในตารางเมตริกซ์ความคลาดเคลื่อน โดยใช้เทคนิคทางสถิติช่วยในการคำนวณ overall accuracy คำนวณได้โดยนำค่าผลรวมในแนวทแยงหลักหารด้วยจำนวนจุดภาพทั้งหมดที่ใช้ในการอ้างอิงในตารางเมตริกซ์ความ



คลาดเคลื่อน $(\frac{\sum_{i=1}^r x_{ii}}{N})$ การวิเคราะห์หาค่า kappa index จะใช้ในการประเมินความถูกต้อง [10-11] และค่า kappa index ใน

เชิงสถิติจะเขียนอยู่ในรูป $\hat{K}$ ซึ่งถือว่าเป็นค่าความถูกต้อง [8] และค่า $\hat{K}$ นี้สามารถคำนวณได้จาก สมการ (1)

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i})} \quad (1)$$

กำหนดให้

r คือ จำนวนแถวของตาราง error matrix

x_{ii} คือ ค่าในแถวที่ i และคอลัมน์ที่ i

x_{i+} คือ ผลรวมของค่าอ้างอิงในแต่ละแถว (แสดงค่าทางขวามือของตาราง error matrix)

x_{+i} คือ ผลรวมของค่าอ้างอิงในแต่ละคอลัมน์ (แสดงค่าทางส่วนล่างของตาราง error matrix)

N คือ ผลรวมจากทุกค่าอ้างอิง

ข้อมูล เครื่องมือ และพื้นที่ศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมแลนด์แซทหลายช่วงเวลาดังตารางที่ 1 มาจำแนกการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินด้วยตัวจำแนกแบบ MLC และ SVMC รวมกับข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศของกรมแผนที่ทหารบริเวณเมืองขอนแก่น ปี พ.ศ.2535 และ พ.ศ.2540 และ ข้อมูลจากการลงพื้นที่บริเวณเขตเมืองขอนแก่น ปี พ.ศ.2558 ในตรวจสอบและวิเคราะห์ความถูกต้องของการจำแนก และในการจำแนกด้วย MLC และ SVMC ด้วยโปรแกรม ENVI 5.2 ในการจำแนกประเภทข้อมูลการใช้ที่ดินภาพถ่ายดาวเทียมแลนด์แซท

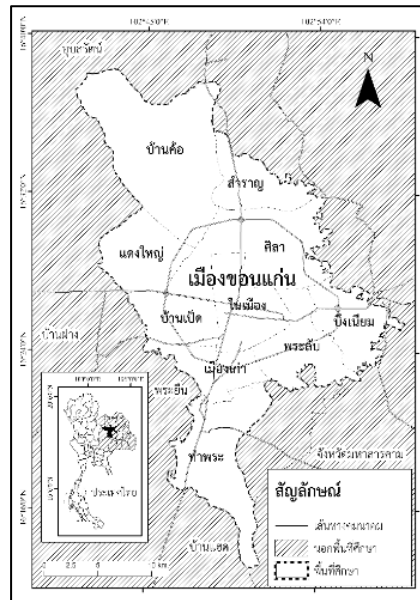
ตารางที่ 1 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมแลนด์แซทที่ใช้ในการจำแนกการใช้ที่ดิน สิ่งปกคลุมดินในระหว่างปี พ.ศ. 2533-2558 (25 ปี)

ดาวเทียม	ตัวรับสัญญาณ	Path/row	ความละเอียด (เมตร)	บันทึกข้อมูล	หมายเหตุ
Landsat 5	TM	128/49	30x30	26 ธ.ค. 2533	ข้อมูลฤดูแล้ง
Landsat 7	ETM+	128/49	30x30	27 พ.ย. 2542	ข้อมูลฤดูแล้ง
Landsat 8	OLI	128/49	30x30	31 ธ.ค. 2558	ข้อมูลฤดูแล้ง

รายละเอียดของพื้นที่ศึกษา

เมืองขอนแก่นตั้งอยู่ในภูมิภาคที่เป็นที่ราบสูงเป็นศูนย์กลางการคมนาคมของภาคตะวันออกเฉียงเหนือตลอดจนการเป็นศูนย์กลางทางการศึกษา การแพทย์ และเศรษฐกิจของภูมิภาค เมืองขอนแก่นอยู่ห่างจากกรุงเทพมหานคร 445 กิโลเมตร อยู่ระหว่างเส้นรุ้งที่ 16° 10'-16° 40' องศาเหนือ และเส้นแวงที่ 102° 39'-103° 01' องศาตะวันออก (ภาพที่ 3) บริเวณพื้นที่ศึกษาซึ่งนับว่าเป็นบริเวณที่มีการเติบโตและมีการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินไปอย่างมากซึ่งประกอบด้วย ตำบลในเมือง ตำบลศิลา ตำบลเมืองเก่า ตำบลพระลับ ตำบลบ้านเป็ด ตำบลสำราญ ตำบลท่าพระ ตำบลบึงเนียม ตำบลแดงใหญ่ และตำบลบ้านค้อ ซึ่งมีเนื้อที่ประมาณ 520 ตารางกิโลเมตร มีค่าระดับโดยเฉลี่ยประมาณ 165 เมตรเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง มีลักษณะเป็นที่ราบลุ่ม แอ่งลุ่มน้ำชีและลุ่มน้ำพอง ปริมาณฝนเฉลี่ย

รายปีประมาณ 1,300 มิลลิเมตร สภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินมีการปลูกพืชในพื้นที่ลุ่ม คือข้าวและสามารถทำได้ทั้งข้าวนาปีและนาปรัง ในสภาพที่ดอนจะมีการปลูกอ้อย มันสำปะหลัง และข้าวโพด



ภาพที่ 3 พื้นที่ศึกษาที่ตั้งอยู่ในเมืองขอนแก่น คัดแปลงจาก [12]

วิธีดำเนินงานวิจัย

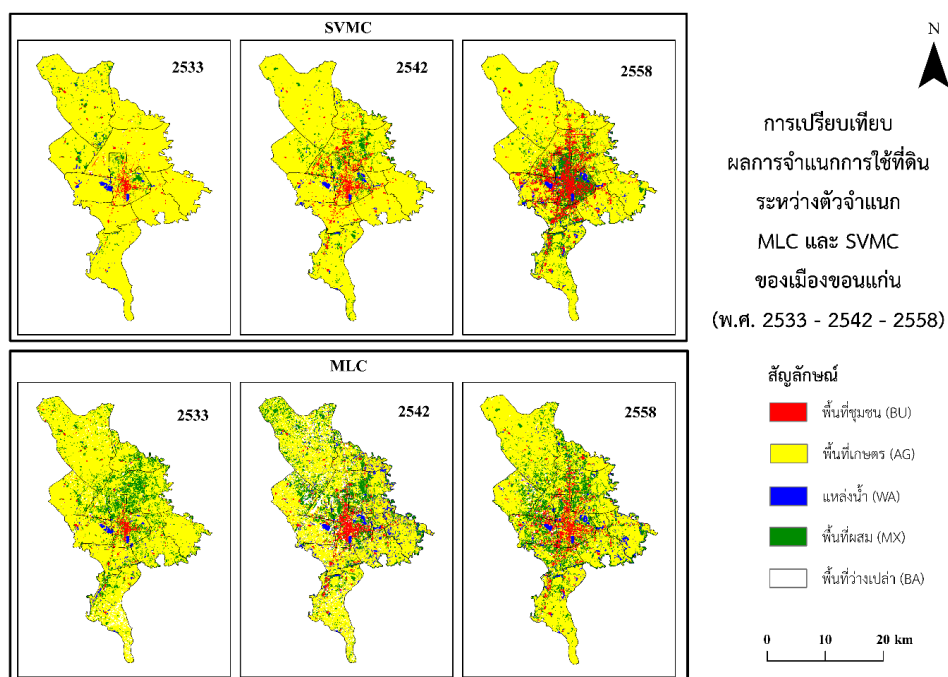
ในการศึกษาวิจัย เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบความถูกต้องของแผนที่การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินด้วยตัวจำแนก MLC และ SVMC สามารถสรุปวิธีการดำเนินการได้ดังนี้

การปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศของภาพดาวเทียมของแต่ละปี โดยดำเนินการปรับแก้ค่าคุณลักษณะเชิงคลื่นของแต่ละปีด้วยโมดูล FLAASH ของซอฟต์แวร์ ENVI ที่มีการใช้แบบจำลองชั้นบรรยากาศ MODTRAN โดยกองทัพอากาศสหรัฐอเมริกา [13] แล้วจึงกำหนดพื้นที่ตัวอย่างเพื่อใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลแต่ละประเภท เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าทางสถิติกับกลุ่มพื้นที่ตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าสหสัมพันธ์เพื่อใช้ค่าสถิตินั้นในการกำหนดประเภทข้อมูล โดยการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินในพื้นที่ศึกษาในแต่ละปีจะใช้ทั้งตัวจำแนกแบบความเป็นไปได้สูงที่สุด (Maximum Likelihood Classifier, [MLC]) และตัวจำแนกแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machines Classifier, [SVMC]) เพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบความถูกต้องที่ได้จากการจำแนกในแต่ละแบบเพื่อประเมินความเหมาะสมกับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินที่ต้องใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat หลายช่วงเวลาที่สุดคล้องกับประเมินการขยายตัวของเมืองขอนแก่น ในการประเมินความถูกต้องของการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินของปี พ.ศ.2533 พ.ศ.2542 และ พ.ศ.2558 จะใช้ภาพถ่ายทางอากาศของกรมแผนที่ทหาร และข้อมูลจากการสำรวจงานสนาม สำหรับใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินในแต่ละภาพแต่ละปี เราทำการสุ่มเลือกจุดในภาพดาวเทียมอย่างน้อย 50 จุด [10] ในแต่ละประเภทการใช้ที่ดิน แล้วนำมาเปรียบเทียบกับภาพถ่ายทางอากาศ หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการเปรียบเทียบมาสร้างตาราง error matrix เพื่อตรวจสอบค่า user's accuracy ค่า producer's accuracy ค่า kappa index และค่า overall accuracy ว่าการจำแนกประเภทภาพถ่ายดาวเทียมอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่



ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้กันพื้นที่สนามบินออกจากการจำแนกและแบ่งการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินในพื้นที่ศึกษาแบ่งออกเป็น 5 ประเภทคือ พื้นที่ชุมชน (built-up area, [BU]) พื้นที่เกษตร (agriculture, [AG]) แหล่งน้ำ (water body, [WA]) พื้นที่ผสม (mixed-range land, [MX]) และพื้นที่ว่างเปล่า (bare land, [BA]) โดยในการศึกษาวิจัยนี้ได้เริ่มต้นด้วยกระบวนการเตรียมข้อมูลก่อนการจำแนก โดยเริ่มต้นที่การปรับแก้ข้อมูลเชิงคลื่นของภาพถ่ายดาวเทียม Landsat เพื่อปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศก่อนการนำข้อมูลทั้งสามปีมาเปรียบเทียบกัน แล้วต่อด้วยการกำหนดพื้นที่ตัวอย่างเพื่อจำแนกข้อมูลและคุณสมบัติของข้อมูลแล้ว ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้การจำแนกประเภทการใช้ที่ดินในพื้นที่ศึกษา โดยเป็นการเปรียบเทียบผลการจำแนกการใช้ที่ดินระหว่างตัวจำแนก MLC และ SVMC ของเมืองขอนแก่นในปี ในปี พ.ศ.2533 พ.ศ.2542 และ พ.ศ.2558 โดยสามารถผลิตออกมาเป็นแผนที่การใช้ที่ดินดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบผลการจำแนกการใช้ที่ดินระหว่างตัวจำแนกแบบ MLC และ SVMC ของเมืองขอนแก่นในปี พ.ศ.2533 พ.ศ.2542 และ พ.ศ.2558 โดยสามารถผลิตออกมาเป็นแผนที่การใช้ที่ดิน

การตรวจสอบความถูกต้องของการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินของปี พ.ศ.2533 และ พ.ศ.2542 ได้ใช้ภาพถ่ายทางอากาศของกรมแผนที่ทหาร ในการตรวจสอบความถูกต้อง และผลของปี พ.ศ.2558 เราจะทำการเลือกจุดภาพที่จะใช้ในการตรวจสอบในแต่ละประเภทของการใช้ที่ดินเกินกว่า 50 จุดภาพ ดังตารางที่ 2 และ 3 โดยการตรวจสอบการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินของปี พ.ศ.2533 พ.ศ.2542 และ พ.ศ.2558 พบว่า การจำแนกด้วย SVMC ให้ค่า kappa index เท่ากับ 0.9 ของทั้งสามปี ในขณะที่ MLC มีค่า kappa index อยู่ที่ 0.5, 0.4 และ 0.8 และค่า overall accuracy โดยรวมของทั้ง SVMC และ MLC ต่ำกว่าร้อยละ 75 ซึ่งจะเห็นว่า ในภาพรวม SVMC ให้ความถูกต้องโดยรวมที่เกินกว่าร้อยละ 90 โดยพบต่อไปว่า ผลลัพธ์ของการจำแนกข้อมูล ปี พ.ศ.2533 และ พ.ศ.2542 ซึ่งเป็นการคัดเลือกพื้นที่ตัวอย่างจากข้อมูลในอดีตทำให้จำนวนพื้นที่ตัวอย่างที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์มีจำนวนที่ค่อนข้างจำกัด มีค่า kappa index ของ MLC แล้วจะมีค่าเพียง 0.5 และ 0.4 ตามลำดับ ในขณะที่ ผลลัพธ์ของ SVMC มีค่า 0.9 นั้น แสดงถึงประสิทธิภาพของ SVMC ที่เหนือกว่า MLC ในการจำแนกข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมโดยใช้พื้นที่ตัวอย่างที่มีอยู่อย่างจำกัดได้เป็นอย่างดี ซึ่งตรงกับข้อเสนอแนะของ [14]

เมื่อวิเคราะห์ลงลึกไปถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในตารางที่ 4 และกราฟในภาพที่ 5 แล้วนั้น สะท้อนให้เห็นชัดถึงความถูกต้องในการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินด้วยวิธี SVMC ได้เป็นอย่างดี โดยจะเห็นได้จาก แนวโน้มของการใช้ที่ดินเป็นพื้นที่เกษตรที่มีแนวโน้มที่จะลดลง และการเพิ่มปริมาณของแหล่งน้ำอย่างต่อเนื่องในเขต เมืองอันจะเป็นแหล่งน้ำที่ทั้งใช้เพื่อการสาธารณูปโภคและที่ใช้เพื่อการรองรับการระบายน้ำออกจากพื้นที่ชุมชน ในขณะที่ผลลัพธ์จากวิธี MLC ให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างในประเภทของการใช้ที่ดินดังกล่าว ผู้วิจัยได้นำผลลัพธ์จากวิธี SVMC และ MLC กับคนที่พำนักอาศัยอยู่ในพื้นที่เป็นเวลากว่า 30 ปี จำนวน 15 คน พบว่า ได้ความเห็นที่เป็นไปในทิศทาง เดียวกันคือ ผลลัพธ์จาก SVMC ได้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ที่สอดคล้องกับความเป็นจริงมาก ในขณะที่ MLC มีผลลัพธ์ที่สวนทางกับความเป็นจริง จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า วิธี SVMC เหมาะสมอย่าง ยิ่งสำหรับนำมาใช้ในการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินเพื่อวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน

ตารางที่ 2 สรุปความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลด้วยวิธี SVMC

year	classified data	reference data					row	user's
		BU	AG	WA	GR	BA	total	accuracy (%)
พ.ศ. 2533	BU	2,876	24	2	5	7	2,914	99
	AG	217	8,7493	130	327	18	88,185	99
	WA	4	126	3,924	0	3	4,057	97
	MX	5	1,235	11	9,136	0	10,387	88
	BA	4	396	0	0	1,984	2,384	83
	column total	3,106	89,274	4,067	9,468	2,012		
	producer's accuracy (%)	93	98	96	96	97		
overall accuracy (%)		98	kappa index			0.9		
พ.ศ. 2542	BU	3,779	601	6	11	64	4,461	85
	AG	464	72,600	93	574	41	73,772	98
	WA	0	1,581	10,476	15	1	12,073	87
	MX	17	1,117	26	8,299	0	9,459	88
	BA	5	1,454	0	0	6,702	8,161	82
	column total	4,265	77,353	10,601	8,899	6,808		
	producer's accuracy (%)	89	94	99	93	98		
overall accuracy (%)		94	kappa index			0.9		
พ.ศ. 2558	BU	8,526	150	15	32	179	8,902	96
	AG	397	37,247	356	826	385	39,211	95
	WA	11	152	7,061	17	0	7,241	98
	MX	28	356	27	7,334	4	7,749	95
	BA	154	886	9	2	2,805	3,856	73
	column total	9,116	3,8791	7,468	8,211	3,373		
	producer's accuracy (%)	94	96	95	89	83		
overall accuracy (%)		94	kappa index			0.9		

* หมายเหตุ พื้นที่ชุมชน (built-up area, [BU]) พื้นที่เกษตร (agriculture, [AG]) แหล่งน้ำ (water body, [WA])
พื้นที่ผสม (mixed-range land, [MX]) และพื้นที่ว่างเปล่า (bare land, [BA])

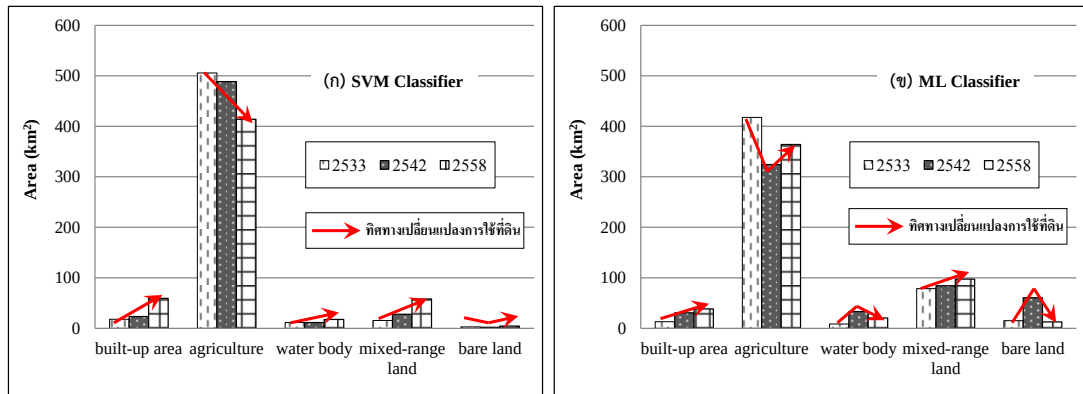


ตารางที่ 3 สรุปความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลด้วยวิธี MLC

year	classified data	reference data					row	user's
		BU	AG	WA	GR	BA	total	accuracy (%)
บพ.ศ. 2533	BU	2,714	150	37	5	8	2,914	93
	AG	281	85,821	1,129	813	141	88,185	97
	WA	1	1,191	2,864	1	0	4,057	71
	MX	92	7,250	57	2,980	8	10,387	29
	BA	88	1,948	8	10	330	2,384	14
	column total	3,176	96,360	4,095	3,809	487		
	producer's accuracy (%)	86	89	70	78	68		
	overall accuracy (%)	88		kappa index		0.5		
พ.ศ. 2542	BU	2,901	1,516	2	29	13	4,461	65
	AG	86	72,839	475	214	158	73,772	99
	WA	19	8,860	3,144	43	7	12,073	26
	MX	45	5,706	233	3,466	9	9,459	37
	BA	125	7,439	240	57	300	8,161	4
	column total	3,176	96,360	4,094	3,809	487		
	producer's accuracy (%)	91	76	77	91	62		
	overall accuracy (%)	77		kappa index		0.4		
พ.ศ. 2558	BU	8,447	158	72	20	205	8,902	95
	AG	1,075	36,946	183	433	574	39,211	94
	WA	12	1,139	6,034	52	4	7,241	83
	MX	132	1,507	127	5,969	14	7,749	77
	BA	1,509	627	29	17	1674	3,856	44
	column total	11,175	40,377	6,445	6,491	2,471		
	producer's accuracy (%)	76	92	94	92	68		
	overall accuracy (%)	88		kappa index		0.8		

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินของการจำแนกด้วยวิธี SVMC และ MLC

การใช้ที่ดิน	พ.ศ.2533		พ.ศ.2542		พ.ศ.2558	
	SVMC (km ²)	MLC (km ²)	SVMC (km ²)	MLC (km ²)	SVMC (km ²)	MLC (km ²)
BU	17.8	13.2	23.4	30.9	59.2	38.5
AG	505.7	417.7	488.6	324.3	413.9	364.1
WA	11.3	8.5	11.3	33	17.6	20.5
MX	15.4	78.6	27.8	84.4	58.0	97.3
BA	2.9	15	1.9	60.4	4.4	12.6
รวม	553	553	553	553	533	553



ภาพที่ 5 กราฟเปรียบเทียบผลลัพธ์การจำแนกการใช้ที่ดินแต่ละประเภทที่แสดงให้เห็นถึงทิศทางเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินของการจำแนกด้วยวิธี SVMC และ MLC

บทสรุป

งานศึกษาวิจัยได้วิเคราะห์เปรียบเทียบความถูกต้องของตัวจำแนกระหว่างวิธีแบบความน่าจะเป็นได้สูงสุด (Maximum Likelihood Classifier, [MLC]) กับ วิธีแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine Classifier, [SVMC]) ในการศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและการขยายตัวของเมืองขอนแก่น ในช่วงปี พ.ศ. 2533 -2558 โดยอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมแลนด์แซทหลายช่วงเวลา เพื่อจำแนกการใช้ที่ดินออกเป็น 5 ประเภทดังนี้ พื้นที่ชุมชน (built-up area, [BU]) พื้นที่เกษตร (agriculture, [AG]) แหล่งน้ำ (water body, [WA]) พื้นที่ผสม (mixed-range land, [MX]) และพื้นที่ว่างเปล่า (bare land, [BA]) แต่ละประเภทการใช้ที่ดินของปี พ.ศ.2533 พ.ศ.2542 และ พ.ศ.2558 พบว่า วิธี SVMC ให้ค่า overall accuracy และค่า kappa index ที่สูงกว่า วิธี MLC โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผลลัพธ์จากวิธี SVMC ของปี พ.ศ.2533 และ พ.ศ.2542 มีค่า kappa index ของทั้งสองปี มีค่า 0.9 ในขณะที่ ผลลัพธ์จากวิธี MLC มีค่าไม่เกิน 0.5 ซึ่งสะท้อนให้เห็นชัดเจนว่า วิธี SVMC นั้นสามารถนำมาใช้จำแนกภาพถ่ายดาวเทียมของปีอดีตที่จำนวนพื้นที่ตัวอย่างมีอยู่ค่อนข้างจำกัดได้เป็นอย่างดี และชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ผลลัพธ์จากวิธี SVMC เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินมาก ทั้งนี้เพราะพื้นที่ตัวอย่างของการใช้ที่ดินในปี อดีตมีอยู่อย่างจำกัดมาก ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อนำไปสอบถามกับคนอาศัยอยู่ในพื้นที่เมืองขอนแก่นมากกว่า 30 ปี จำนวน 15 คน ยังทำให้พบต่อไปว่า ผลลัพธ์จากวิธี SVMC นั้นสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินมากกว่าผลลัพธ์จากวิธี MLC ดังนั้น ผลจากการศึกษาวิจัยนี้ทำให้ได้ข้อสรุปที่ว่า วิธี SVMC นั้นเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินซึ่งมักประสบกับปัญหาที่พื้นที่ตัวอย่างในอดีตมีอยู่อย่างจำกัด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทุนการศึกษา KKU Scholarship for ASEAN and GMS Countries' Personnel และทุนอุดหนุน และส่งเสริมการทำวิทยานิพนธ์บัณฑิตวิทยาลัย จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น และขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้าง ฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้อห้องทำวิจัยตลอดจนสนับสนุนและเครื่องคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพ สูงในการประมวลผลข้อมูล และขอขอบคุณหน่วยงาน USGS ที่อนุเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat หลายช่วงเวลา และท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งต่อท่านอาจารย์สุรัตน์ ประมวลศักดิ์กุล หัวหน้าแผนกวิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ GPS มือถือ



เอกสารอ้างอิง

1. Karuga JG. Actions towards a better Nairobi: report and recommendations of the Nairobi city convention. City Hall, Nairobi. 1993.
2. Foody G. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. *The Photogrammetric Record*. 2010; 25(130): 204–205.
3. Mundia CN, Aniya M. Analysis of land use/cover changes and urban expansion of Nairobi city using remote sensing and GIS. *International Journal of Remote Sensing*. 2005; 26(13): 2831-2849.
4. Kamusoko C, Aniya M. Hybrid classification of landsat data and GIS for land use/cover change analysis of the Bindura district, Zimbabwe. *International Journal of Remote Sensing*. 2009; 30(1): 97-115.
5. Van TT, Bao XH. Study of the impact of urban development on surface temperature using remote sensing in Ho Chi Minh city, southern Vietnam: Study of the impact of urban development on surface temperature. *Geographical Research*. 2010; 48(1): 86-96.
6. Burges CJC. A tutorial on support vector machines for pattern recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery*. 1998; 2(2): 121-167.
7. Lillesand TM, Kiefer RW. Remote sensing and image interpretation. 4th ed. New York: John Wiley & Sons; 2000. 724 p.
8. Congatton RG, Green K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis; 2009. 183 p.
9. Hay AM. Sampling designs to test land-use map accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1979; 45(4): 529-533.
10. Congatton RG, Mead RA. A quantitative method to test for consistency and correctness in photointerpretation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1983; 49(1): 69-74.
11. Jensen JR. Introductory digital image processing. A remote sensing perspective. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall; 1996. 316 p.
12. Tran VN. Land use/cover changes and landscape fragmentation analysis in Khon Kaen city [MSc thesis]. Khon Kaen: Khon Kaen University; 2017.
13. Berk A, Conforti P, Kennett R, Perkins T, Hawes F, van den Bosch J. MODTRAN6: a major upgrade of the MODTRAN radiative transfer code. In: Velez-Reyes M, Kruse FA, editors; 2014.
14. Mountrakis G, Im J, Ogole C. Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2011; 66(3): 247-259.