

**DEVELOPMENT OF ANALYSIS AND EVALUATION
TECHNIQUES FOR THAICHOTE
IMAGE PAN-SHARPENING**

Sawarin Lerk-u-suke



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Doctor of Philosophy in Geoinformatics

Suranaree University of Technology

Academic Year 2014

การพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์และประเมินผลสำหรับการปรับปรุงข้อมูลภาพ
จากดาวเทียมไทยโชตด้วยกระบวนการเพนชาร์ปเพนนิ่ง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาภูมิสารสนเทศ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

**DEVELOPMENT OF ANALYSIS AND EVALUATION
TECHNIQUES FOR THAICHOTE IMAGE PAN-SHARPENING**

Suranaree University of Technology has approved this thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.

Thesis Examining Committee

S. Dasananda
(Asst. Prof. Dr. Songkot Dasananda)

Chairperson
Suwit Ong.
(Assoc. Prof. Dr. Suwit Ongsomwang)

Member (Thesis Advisor)
S. Sarapirome.
(Asst. Prof. Dr. Sunya Sarapirome)

Member
Phisan Santitamont
(Assoc. Prof. Dr. Phisan Santitamont)

Member
Dusdi Chanlikit
(Dr. Dusdi Chanlikit)

Member

Sukit Limpijumhong
(Prof. Dr. Sukit Limpijumhong)

Vice Rector for Academic Affairs
and Innovation

P. Manyum
(Assoc. Prof. Dr. Prapun Manyum)

Dean of Institute of Science

สวรินทร์ ฤกษ์อยู่สุข : การพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์และประเมินผลสำหรับการปรับปรุงข้อมูลภาพจากดาวเทียมไทยโชตด้วยกระบวนการแพนชาร์ปเพนนิ่ง (DEVELOPMENT OF ANALYSIS AND EVALUATION TECHNIQUES FOR THAICHOTE IMAGE PAN-SHARPENING) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์ อ่องสมหวัง, 217 หน้า

ในการประยุกต์การรับรู้จากระยะไกลมักต้องการความละเอียดเชิงพื้นที่และเชิงคลื่นของข้อมูลภาพที่มีความละเอียดสูง เพื่อให้ได้มาซึ่งรายละเอียดเชิงพื้นที่และการสกัดสารสนเทศเฉพาะเรื่องที่ถูกต้องมากขึ้น ในปัจจุบันสารสนเทศที่จำเป็นสำหรับกระบวนการแพนชาร์ปเพนนิ่งกับข้อมูลภาพจากดาวเทียมไทยโชตยังมีไม่มากนัก วัตถุประสงค์หลักของการศึกษาคือ (1) เพื่อจัดเตรียมและตรวจวัดคุณภาพข้อมูลภาพจากดาวเทียมไทยโชตที่ผ่านกระบวนการแพนชาร์ปเพนนิ่งสำหรับการหาวิธีการแพนชาร์ปเพนนิ่งที่เหมาะสม (2) เพื่อหาวิธีการแพนชาร์ปเพนนิ่งที่เหมาะสมโดยอาศัยการประเมินจากผู้วิจัยและความต้องการของผู้ใช้งานด้วยเทคนิคแบบ SAW และ (3) เพื่อแนะนำวิธีการแพนชาร์ปเพนนิ่งที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ทางด้านการเกษตร ป่าไม้ และเมือง ในการดำเนินงานอาศัยวิธีการแพนชาร์ปเพนนิ่ง 9 วิธี ประกอบด้วย การแปลงแบบโบรวิ การแปลงแบบการคูณ การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก การแปลงความเข้ม ค่าสี การอิมตัว การแปลงแบบตัดแปลงความเข้ม ค่าสี การอิมตัว การแปลงแบบเวฟเลต การกรองความถี่สูง การแปลงแบบ Ehlers และ การแปลงแบบ Gram-Schmidt และทำการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพโดยอาศัยเกณฑ์คุณภาพข้อมูลภาพ 4 เกณฑ์ ได้แก่ การวิเคราะห์ภาพด้วยสายตา การวิเคราะห์การตรวจจับเส้นขอบ ดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพ และผลกระทบต่อความถูกต้องของการจำแนก จากนั้น ทำการประเมินหาวิธีการแพนชาร์ปเพนนิ่งที่เหมาะสมโดยการประเมินจากผู้วิจัยและจากความต้องการของผู้ใช้งานด้วยเทคนิคแบบ SAW

ผลการศึกษา พบว่า หากพิจารณาเกณฑ์คุณภาพข้อมูลภาพแบบเอกเทศ ซึ่งประกอบด้วย การวิเคราะห์ภาพด้วยสายตา การวิเคราะห์การตรวจจับเส้นขอบ ดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพ และผลกระทบต่อความถูกต้องของการจำแนก วิธีการแพนชาร์ปเพนนิ่งที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลภาพจากดาวเทียมไทยโชต ได้แก่ การแปลงแบบ Gram-Schmidt การกรองความถี่สูง การแปลงแบบตัดแปลงความเข้ม ค่าสี การอิมตัว และการแปลงแบบ Ehlers ตามลำดับ

สำหรับวิธีการแพนชาร์ปเพนนิ่งที่เหมาะสมจากการประเมินโดยผู้วิจัยด้วยเทคนิคแบบ SAW ที่มีกรให้ค่าน้ำหนักเกณฑ์แก่คุณภาพข้อมูลภาพเท่ากันทุกเกณฑ์ พบว่า วิธีการแพนชาร์ปเพนนิ่งที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลภาพจากดาวเทียมไทยโชตในการใช้งานทางด้านการเกษตร

SAWARIN LERK-U-SUKE : DEVELOPMENT OF ANALYSIS AND
EVALUATION TECHNIQUES FOR THAICHOTE IMAGE PAN-
SHARPENING. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SUWIT
ONGSOMWANG, Dr. rer. Nat. 217 PP.

THAICHOTE DATA / IMAGAE QUALITY CRITERIA / OPTIMUM PAN-
SHARPENING METHOD / MCDA

In remote sensing applications, both high spatial and spectral resolutions are often required to achieve more spatial-details and more accurate thematic information extraction. However, there is insufficient information on Thaichote pan-sharpening process. The main objectives of the study are (1) to prepare and measure image qualities of Thaichote pan-sharpened data for an optimum pan-sharpening method identification, (2) to identify an optimum pan-sharpening method by self-evaluation and the users' requirement with Simple Additive Weighting (SAW) technique, and (3) to suggest optimum pan-sharpening method for agriculture, forestry, and urban applications. Herein, nine selected pan-sharpening methods; namely Brovey, Multiplicative, IHS, Modified IHS, PCA, Wavelet, High Pass Filtering, Ehlers, and Gram-Schmidt are firstly applied and then examined by image quality criteria consisting of visual image analysis, edge detection analysis, image quality indices, and effect on classification accuracy. Then, optimum pan-sharpening method is identified based on self-evaluation and the users' requirement with SAW technique.

As a result, the most appropriate method for Thaichote pan-sharpening based on single image quality criterion using visual image analysis, edge detection analysis,

quality indices, and effect on classification accuracy is Gram-Schmidt, High pass Filtering, Modified IHS, and Ehlers respectively.

For an optimum pan-sharpening method by self-evaluation with equal weight of SAW technique, an optimum pan-sharpening method for Thaichote data in agriculture, forestry, and urban was High Pass Filtering, High Pass Filtering or Gram-Schmidt, and Gram-Schmidt. Meanwhile, an optimum pan-sharpening method for Thaichote data by users' requirement SAW technique with specific weight for each criterion according to expert groups in agriculture, forestry, and urban was Gram-Schmidt. Consequently, an optimum pan-sharpening method for Thaichote data in three applications (agriculture, forestry, and urban) was also Gram-Schmidt. However, when software availability is considered, High Pass Filtering can be selected as an optimum pan-sharpening method. In addition, Wavelet is the most inappropriate for Thaichote pan-sharpening creation in three applications.

In conclusion, integration of image quality criteria with the users' requirement using MCDA can quantify and identify an optimum pan-sharpening method for Thaichote image in agriculture, forestry, and urban applications.

School of Remote Sensing

Academic Year 2014

Student's Signature ศิริพร กนกศิลป์

Advisor's Signature Switong

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to express my sincere thankfulness to my thesis advisor, Assoc. Prof. Dr. Suwit Ongsomwang, for his guidance, suggestion, motivation, untiring help, and immense knowledge given to me during the period of my study at SUT. Without his support, my thesis would not be completed successfully.

Besides my advisor, I would like to thank my thesis committee: Asst. Prof. Dr. Sunya Sarapirome, Assoc. Prof. Dr. Phisan Santitamnont, Asst. Prof. Dr. Songkot Dasananda, and Dr. Dusdi Chanlikit for helpful comments and suggestions.

I would also like to thank GISTDA, Land Development Department, Office of Agricultural Economics, Royal Forest Department, Department of National parks, Wildlife and Plant Conservation, Department of Public Works and Town & Country Planning, and lecturers from Kasetsart University and Rajamangala University of Technology Isan, for supporting the data and information to the research.

I gratefully express my warm thanks to all friends at the School of Remote Sensing for their care, help and support.

Finally, I would like to thank my family for their love, great care, patience, and support throughout my life.

Sawarin Lerk-u-suke

CONTENTS

	Page
ABSTRACT IN THAI.....	I
ABSTRACT IN ENGLISH	III
ACKNOWLEDGEMENTS.....	V
CONTENTS.....	VI
LIST OF TABLES.....	XII
LIST OF FIGURES	XVIII
LIST OF ABBREVIATIONS.....	XXIV
CHAPTER	
I INTRODUCTION.....	1
1.1 Background and significance of the study.....	1
1.2 Research objectives.....	2
1.3 Scope and limitation of the study.....	3
1.4 Testing areas.....	4
1.4.1 Background	4
1.4.2 Characteristic of testing areas for agriculture application.....	7
1.4.3 Characteristic of testing areas for forestry application.....	9
1.4.4 Characteristic of testing areas for urban application.....	12
1.5 Benefit of the study	14
II BASIC CONCEPTS AND LITERATURE REVIEWS.....	15

CONTENTS (Continued)

	Page
2.1 Technical specification of Thaichote satellite imagery.....	15
2.2 Pan-sharpening methods	17
2.2.1 Brovey transformation.....	17
2.2.2 Multiplicative Transformation	17
2.2.3 Intensity-Hue-Saturation transformation.....	18
2.2.4 Modified IHS transformation	19
2.2.5 Principal Component Analysis.....	20
2.2.6 Wavelet transformation	21
2.2.7 High Pass Filtering	22
2.2.8 Ehlers fusion.....	24
2.2.9 Gram-Schmidt pan-sharpening	25
2.3 Image resampling methods	27
2.3.1 Nearest neighbor	27
2.3.2 Bilinear Interpolation	27
2.3.3 Cubic Convolution	27
2.4 Image quality evaluation	28
2.4.1 Visual image analysis (VIA)	28
2.4.2 Edge detection analysis (EDA)	29
2.4.3 Quality indices (QI).....	31
2.5 Decision process and Simple additive weighting.....	35

CONTENTS (Continued)

	Page
2.5.1 Simple additive weighting (SAW).....	36
2.5.2 Questionnaire.	37
2.6 Literature reviews.....	38
III MATERIALS AND METHODOLOGY	45
3.1 Data.....	45
3.1.1 THEOS satellite data	45
3.1.2 Ground control point (GCP)	48
3.1.3 LDD datasets	50
3.2 Tools.....	50
3.2.1 ENVI.....	50
3.2.2 ERDAS Imagine.....	51
3.2.3 MATLAB.....	51
3.2.4 Questionnaire	52
3.3 Research methodology	53
3.3.1 Data collection and orthorectification	55
3.3.1.1 DEM correction.....	56
3.3.1.2 GCP collection and measurement	56
3.3.1.3 Thaichote orthorectification	57
3.3.2 Pan-sharpening process	58
3.3.3 Image quality evaluation	60

CONTENTS (Continued)

	Page
3.3.3.1 Visual image analysis	61
3.3.3.2 Edge detection analysis	61
3.3.3.3 Quality indices	62
3.3.3.4 Effect on classification accuracy	62
3.3.4 Optimum pan-sharpening method identification.....	63
3.3.4.1 Optimum pan-sharpening method identification by self-evaluation	63
3.3.4.2 Optimum pan-sharpening method identification based on users' requirement	64
IV RESULTS AND DISCUSSIONS	65
4.1 Data preparation and orthorectification	65
4.1.1 Thaichote orthorectification	67
4.2 Pan-sharpening process	70
4.3 Image quality evaluation	92
4.3.1 Visual image analysis (VIA)	92
4.3.2 Edge detection analysis (EDA)	97
4.3.3 Quality indices (QI).....	105
4.3.4 Effect on classification accuracy (ECA)	112
4.4 Optimum pan-sharpening method by self-evaluation	123
4.4.1 Optimum pan-sharpening method for agriculture application	123

CONTENTS (Continued)

	Page
4.4.2 Optimum pan-sharpening method for forestry application	127
4.4.3 Optimum pan-sharpening method for urban application	130
4.4.4 Optimum pan-sharpening method for three applications	133
4.5 Optimum pan-sharpening method based on users' requirement.....	134
4.5.1 Optimum pan-sharpening method for agriculture application	135
4.5.2 Optimum pan-sharpening method for forestry application	138
4.5.3 Optimum pan-sharpening method for urban application	141
4.5.4 Optimum pan-sharpening method for three applications	144
4.6 Effect of resampling technique on Thaichote image pan-sharpening	145
V CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS	147
5.1 Conclusions	147
5.1.1 Image quality evaluation based on single criteria	147
5.1.2 Optimum pan-sharpening method by self-evaluation	150
5.1.3 Optimum pan-sharpening method based on users' requirement...	151
5.1.4 Effect of resampling techniques on THEOS image pan-sharpening	152
5.2 Recommendations	152
REFERENCES	154
APPENDICES	160

LIST OF TABLES

Table	Page
2.1	Thaichote spectral sensor characteristics 16
2.2	HPK size depends on R value 23
2.3	Center value options depend on HPK size 23
2.4	Range and default for M based on R 24
2.5	The elements of visual image interpretation 29
2.6	Synthesis of literature reviews 43
3.1	Characteristics of Thaichote Level 1A 46
3.2	Characteristics of selected Thaichote images 47
3.3	Specification of LDD color orthophoto and LDD DEM datasets..... 49
3.4	Specification of LDD DEM dataset 49
4.1	Viewing information of Thaichote images 66
4.2	List of RMSE for ground and image control points under orthorectification process 69
4.3	Basic statistic values from 9 pan-sharpening methods for agriculture testing area 1 (A1)..... 83
4.4	Basic statistic values from 9 pan-sharpening methods for agriculture testing area 2 (A2)..... 84
4.5	Basic statistic values from 9 pan-sharpening methods for forestry testing area F1 (F1)..... 85

LIST OF TABLES (Continued)

Table		Page
4.6	Basic statistic values from 9 pan-sharpening methods for forestry testing area F2 (F2)	86
4.7	Basic statistic values from 9 pan-sharpening methods for urban testing area 1 (U1).....	87
4.8	Basic statistic values from 9 pan-sharpening methods for urban testing area 2 (U2).....	88
4.9	Results of image quality evaluation using visual image analysis of agriculture testing area 1 (A1)	93
4.10	Results of image quality evaluation using visual image analysis of agriculture testing area 2 (A2)	93
4.11	Results of image quality evaluation using visual image analysis of forestry testing area 1 (F1).....	94
4.12	Results of image quality evaluation using visual image analysis of forestry testing area 2 (F2).....	94
4.13	Results of image quality evaluation using visual image analysis of urban testing area 1 (U1).....	95
4.14	Results of image quality evaluation using visual image analysis of urban testing area 2 (U2).....	95
4.15	CC values from Sobel and Laplacian operator and its normalized score of agriculture testing area 1 (A1)	100

LIST OF TABLES (Continued)

Table		Page
4.16	CC values from Sobel and Laplacian operator and its normalized score of agriculture testing area 2 (A2).....	100
4.17	CC values from Sobel and Laplacian operator and its normalized score of forestry testing area 1 (F1).....	101
4.18	CC values from Sobel and Laplacian operator and its normalized score of forestry testing area 2 (F2).....	101
4.19	CC values from Sobel and Laplacian operator and its normalized score of urban testing area 1 (U1).....	102
4.20	CC values from Sobel and Laplacian operator and its normalized score of urban testing area 2 (U2).....	102
4.21	Results of image quality evaluation using QI of agriculture testing area 1 (A1).....	106
4.22	Results of image quality evaluation using QI of agriculture testing area 2 (A2).....	106
4.23	Results of image quality evaluation using QI of forestry testing area 1 (F1).....	106
4.24	Results of image quality evaluation using QI of forestry testing area 2 (F2).....	107
4.25	Results of image quality evaluation using QI of urban testing area 1 (U1).....	107

LIST OF TABLES (Continued)

Table	Page
4.26 Results of image quality evaluation using QI of for urban testing area 2 (U2).....	107
4.27 Normalized values of QI results as total score and normalized score of agriculture testing area 1 (A1).	108
4.28 Normalized values of QI results as total score and normalized score of agriculture testing area 2 (A2).	108
4.29 Normalized values of QI results as total score and normalized score of forestry testing area 1 (F1).....	109
4.30 Normalized values of QI results as total score and normalized score of forestry testing area 2 (F2).....	109
4.31 Normalized values of QI results as total score and normalized score of urban testing area 1 (U1).....	110
4.32 Normalized values of QI results as total score and normalized score of urban testing area 2 (U2).....	110
4.33 Numbers of land use classes in each testing area for each application.....	114
4.34 Results of accuracy assessment and its normalized score for agriculture testing area 1 (A1).....	115
4.35 Results of accuracy assessment and its normalized score for agriculture testing area 2 (A2).....	115
4.36 Results of accuracy assessment and its normalized score for forestry testing area 1 (F1)	116

LIST OF TABLES (Continued)

Table	Page
4.37 Results of accuracy assessment and its normalized score for forestry testing area 2 (F2)	116
4.38 Results of accuracy assessment and its normalized score for urban testing area 1 (U1).....	117
4.39 Results of accuracy assessment and its normalized score for urban testing area 2 (U2).....	117
4.40 Normalized score and total score by SAW with equal weight and its rank of agriculture testing area 1 (A1)	125
4.41 Normalized score and total score by SAW with equal weight and its rank of agriculture testing area 2 (A2)	125
4.42 Normalized score and total score by SAW with equal weight and its rank of forestry testing area 1 (F1).....	128
4.43 Normalized score and total score by SAW with equal weight and its rank of forestry testing area 2 (F2).....	128
4.44 Normalized score and total score by SAW with equal weight and its rank of urban testing area 1 (U1).	131
4.45 Normalized score and total score by SAW with equal weight and its rank of urban testing area 2 (U2).	131
4.46 Total and overall scores for three applications (agriculture, forestry and urban) based on self-evaluation.	133
4.47 Weight for each image quality criterion given by each expert group.....	134

LIST OF TABLES (Continued)

Table	Page
4.48 Criterion score and total score using SAW with user's weight and its rank of agriculture testing area 1 (A1)	136
4.49 Criterion score and total score using SAW with user's weight and its rank of agriculture testing area 2 (A2).	136
4.50 Criterion score and total score using SAW with user's weight and its rank of forestry testing area 1 (F1).....	139
4.51 Criterion score and total score using SAW with user's weight and its rank of forestry testing area 2 (F2).....	139
4.52 Criterion score and total score using SAW with user's weight and its rank of urban testing area 1 (U1)	142
4.53 Criterion score and total score using SAW with user's weight and its rank of urban testing area 2 (U2).	142
4.54 Total and overall scores for three applications based on users' requirement.....	144
4.55 Measurement of spectral variation of the different resampling techniques using UIQI	146

LIST OF FIGURES

Figure	Page
1.1 Major land use types in Nakhon Ratchasima province and specific testing areas.....	4
1.2 Major land use types in Pak Chong district and testing areas for agriculture and forestry applications	5
1.3 Major land use type in Mueang Nakhon Ratchasima district and the testing area for urban application	6
1.4 Testing areas for agriculture application: (a) testing area 1 (A1) and (b) testing area 2 (A2).....	7
1.5 Distribution of land use types in testing area 1 (A1) for agriculture application.....	8
1.6 Distribution of land use types in testing area 2 (A2) for agriculture application.....	9
1.7 Testing areas for forestry application: (a) testing area 1 (F1) and (b) testing area 2 (F2).....	10
1.8 Distribution of land use types in testing area 1 (F1) for forestry application .	11
1.9 Distribution of land use types in testing area 2 (F2) for forestry application .	12
1.10 Testing areas for urban application: (a) testing area 1 (U1) and (b) testing area 2 (U2)	13
1.11 Distribution of land use types in testing area 1 (U1) for urban application....	13

LIST OF FIGURES (Continued)

Figure	Page
1.12 Distribution of land use types in testing area 2 (U2) for urban application....	14
2.1 Thaichote spectral sensor characteristics	16
2.2 Workflow of Intensity-Hue-Saturation transformation (IHST).....	19
2.3 Principal Component Analysis (PCA) pan-sharpening workflow.....	21
2.4 Wavelet transformation (WT) pan-sharpening workflow.....	22
2.5 Ehlers fusion (EF) workflow	25
2.6 Characteristics of mask and its coefficient of Sobel operator.....	30
2.7 Characteristics of mask and its coefficient of Laplacian operator.....	31
2.8 Spectral Angle Mapping (SAM).....	34
2.9 Three phases of decision making process	36
3.1 Original scaled Thaichote images in the study: (a) original MS scene1, (b) original PAN scene1, (c) original MS scene2, and (d) original PAN scene2.....	47
3.2 Sample data of Thaichote satellite orientation.....	48
3.3 Two sample of LDD dataset: (a) color orthophoto and (b) DEM.....	50
3.4 Schematic workflow of research methodology.....	54
3.5 Thaichote orthorectification workflow	55
3.6 Measurement of image and ground coordinates of GCPs	57
3.7 The pan-sharpening processing workflow	59
3.8 Testing image for evaluation the effect of resampling method on image pan-sharpening.	60

LIST OF FIGURES (Continued)

Figure	Page
3.9 An optimum pan-sharpening method identification workflow.....	64
4.1 Original Thaichote images: (a) MS1, (b) PAN1, (c) MS2, and (d) PAN2.	66
4.2 GCPs distribution for orthorectification process of each Thaichote images: (a) MS1, (b) PAN1, (c) MS2 and (d) PAN2	68
4.3 Thaichote orthorectified images: (a) MS1, (b) PAN1, (c) MS2, and (d) PAN2.....	70
4.4 Testing images produced from BT method: (a) A1, (b) A2, (c) F1, (d) F2, (e) U1 and (f) U2.....	72
4.5 Testing images produced from MT method: (a) A1, (b) A2, (c) F1, (d) F2, (e) U1 and (f) U2.....	73
4.6 Testing images produced from PCA method: (a) A1, (b) A2, (c) F1, (d) F2, (e) U1 and (f) U2.....	74
4.7 Testing images produced from IHST method: (a) A1, (b) A2, (c) F1, (d) F2, (e) U1 and (f) U2.....	75
4.8 Testing images produced from MIHST method: (a) A1, (b) A2, (c) F1, (d) F2, (e) U1 and (f) U2.....	76
4.9 Testing images produced from HPF method: (a) A1, (b) A2, (c) F1, (d) F2, (e) U1 and (f) U2.....	77
4.10 Testing images produced from WT method: (a) A1, (b) A2, (c) F1, (d) F2, (e) U1 and (f) U2.....	78

LIST OF FIGURES (Continued)

Figure	Page
4.11 Testing images produced from EF method: (a) A1, (b) A2, (c) F1, (d) F2, (e) U1 and (f) U2.....	79
4.12 Testing images produced from GS method: (a) A1, (b) A2, (c) F1, (d) F2, (e) U1 and (f) U2.....	80
4.13 \pm 1SD of the mean brightness value of each band of pan-sharpened image from each method for testing area 1(A1).....	89
4.14 \pm 1SD of the mean brightness value of each band of pan-sharpened image from each method for testing area 2 (A2).....	89
4.15 \pm 1SD of the mean brightness value of each band of pan-sharpened image from each method for testing area 1 (F1).....	90
4.16 \pm 1SD of the mean brightness value of each band of pan-sharpened image from each method for testing area 2 (F2).....	90
4.17 \pm 1SD of the mean brightness value of each band of pan-sharpened image from each method for testing area 1 (U1).....	91
4.18 \pm 1SD of the mean brightness value of each band of pan-sharpened image from each method for testing area 2 (U2).....	91
4.19 Edge detected images using Sobel operator from: (a) panchromatic image (b) pan-sharpened image band1, (c) pan-sharpened image band2 (d) pan-sharpened image band3 of HPF method	98

LIST OF FIGURES (Continued)

Figure	Page
4.20	Edge detected images using Laplacian operator from: (a) panchromatic image (b) pan-sharpened image band1, (c) pan-sharpened image band2 (d) pan-sharpened image band3 of HPF method 99
4.21	Reference and classified land use maps for testing area A1 and A2 118
4.22	Reference and classified land use maps for testing area F1 and F2..... 119
4.23	Reference and classified land use maps for testing area U1 and U2 120
4.24	Distribution of normalized score in each criterion and total score of each pan-sharpening method for agriculture application in testing area 1 (A1) ... 126
4.25	Distribution of normalized score in each criterion and total score of each pan-sharpening method for agriculture application in testing area 2 (A2) ... 126
4.26	Distribution of normalized score in each criterion and total score of each pan-sharpening method for forestry application in testing area 1 (F1)..... 129
4.27	Distribution of normalized score in each criterion and total score of each pan-sharpening method for forestry application in testing area 2 (F2)..... 129
4.28	Distribution of normalized score in each criterion and total score of each pan-sharpening method for urban application in testing area 1 (U1) 132
4.29	Distribution of normalized score in each criterion and total score of each pan-sharpening method for urban application in testing area 2 (U2)... 132
4.30	Distribution of criterion and total scores by users' requirement of each pan-sharpening method for agriculture testing area 1 (A1). 137

LIST OF FIGURES (Continued)

Figure	Page
4.31	Distribution of criterion and total scores by users' requirement of each pan-sharpening method for agriculture testing area 2 (A2)..... 137
4.32	Distribution of criterion and total scores by users' requirement of each pan-sharpening method for forestry testing area 1 (F1)..... 140
4.33	Distribution of criterion and total scores by users' requirement of each pan-sharpening method for forestry testing area 2 (F2)..... 140
4.34	Distribution of criterion and total scores by users' requirement of each pan-sharpening method for urban testing area 1 (U1) 143
4.35	Distribution of criterion and total scores by users' requirement of each pan-sharpening method for urban testing area 2 (U2) 143
4.36	Comparison of UIQI values of pan-sharpening methods from different resampling techniques..... 146

LIST OF ABBREVIATIONS

AWLP	=	Additive Wavelet Luminance Proportional Method
BIL	=	Bilinear Interpolation
BT	=	Brovey Transformation Method
CC	=	Correlation Coefficient
CCD	=	Charge-Coupled Device
CE	=	Cross Entropy
CN	=	Color Normalization Method
CUB	=	Cubic Convolution
DEM	=	Digital Elevation Model
DN	=	Digital Number
DNP	=	Department Of National Parks, Wildlife And Plant Conservation
DPT	=	Department Of Public Works And Town & Country Planning
DWT	=	Discrete Wavelet Transforms
ECA	=	Effect on Classification Accuracy
ED	=	Edge Detection
EDA	=	Edge Detection Analysis
EF	=	Ehlers Fusion Method
ERGAS	=	Relative Dimensionless Global Error In Synthesis

LIST OF ABBREVIATIONS (Continued)

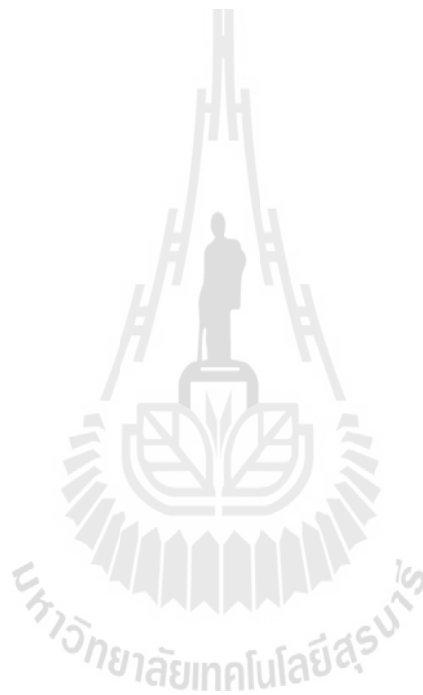
FFT	=	Fast Fourier Transform
GCP	=	Ground Control Point
GISTDA	=	Geo-Informatics and Space Technology Development Agency
GS	=	Gram-Schmidt Pan-Sharpening Method
HCC	=	High Pass Correlation
HPF	=	High Pass Filtering Method
HPK	=	High-Pass Kernel
IHS	=	Intensity, Hue, and Saturation
IHST	=	IHS Transformation Method
ISODATA	=	Iterative Self-Organizing Data Analysis
LDD	=	Land Development Department
LMVM	=	Local Mean and Variance Matching method
LPF	=	Low Pass Filter
M	=	Modulating Factor
MCDA	=	Multi-Criteria Decision Analysis
MIHST	=	Modified IHS Transformation Method
MS	=	Multispectral Image
MT	=	Multiplicative Transformation Method
NIR	=	Near-infrared
NN	=	Nearest Neighbor

LIST OF ABBREVIATIONS (Continued)

OAE	=	Office of Agricultural Economics
PAN	=	Panchromatic Image
PCA	=	Principal Component Analysis Method
QI	=	Quality Indices
QILV	=	Quality Index based on Local Variance
R	=	Scale Ratio
RASE	=	Relative Average Spectral Error
RFD	=	Royal Forest Department
RGB	=	Red, Green, and Blue
RM	=	Relative Shift Of The Mean
RMSE	=	Root Mean Square Error
RRIQA	=	Reduced-Reference Image Quality Assessment
SAM	=	Spectral Angle Mapping
SAW	=	Simple Additive Weighting
SD	=	Standard Deviation
SF	=	Smoothing Filter
SFIM	=	Smoothing Filter-based Intensity Modulation
SID	=	Spectral Information Divergence
SSIM	=	Structure Similarity Index
UIQI	=	Universal Image Quality Index
UTM	=	Universal Transverse Mercator
VIA	=	Visual Image Analysis

LIST OF ABBREVIATIONS (Continued)

VWP	=	Variational Wavelet Pan-sharpening
WLC	=	Weighted Linear Combination
WSNR	=	Weighted Signal To Noise Ratio
WT	=	Wavelet Transformation Method



CHAPTER I

INTRODUCTION

1.1 Background and significance of the study

Pan-sharpening is a technique being used to merge a geometric detail of a high-resolution panchromatic image (PAN) with the color information of a low-resolution multispectral image (MS) for generating a high-spatial resolution MS image (Zhang, 2004). This technique combines a higher spatial details of a high spatial resolution panchromatic image with a high spectral resolution multispectral image for creating a high spatial and high spectral resolution image (Stathaki, 2008).

In remote sensing application, both high spatial and high spectral resolutions are often required to achieve more spatial-details and more accurate information acquisition. Effective fusion of PAN and MS image is required to improve ability of information extraction (Zhang, 2008).

Unfortunately, there is little information based on experimental results and scientific research for selecting and applying an appropriate pan-sharpening method to Thaichote image. Even though Intajag, Wettayaprasit, and Kodchabudthada (2010) had evaluated some fusion methods for Thaichote image with traditional spectral quality indices but their results did not reflect to the specific application. Therefore an effective analysis and comprehensive evaluation of pan-sharpening methods from Thaichote image is needed. Furthermore, a proper pan-sharpening method which responding to users' requirement is here assessed based on the user-oriented approach

to meet the needs on specific applications, namely agriculture, forestry, and urban. The derived results including (1) visual image analysis, (2) edge detection analysis, (3) quality indices, and (4) effect on classification accuracy are to fulfill the users' requirement for developing and implementing an optimum pan-sharpening method from Thaichote image to serve their duties.

1.2 Research objectives

The final goal of the research is to identify an appropriate pan-sharpening method for agriculture, forestry and urban applications by using image quality measurement (visual image analysis, edge detection analysis, spectral quality indices, and effect on classification accuracy) according to self-evaluation and users' requirement. The specific objectives of the study are as follows:

1.2.1 To prepare and evaluate image qualities of Thaichote pan-sharpened data using visual image analysis, edge detection analysis, spectral quality indices, and effect on classification accuracy for an optimum pan-sharpening method identification;

1.2.2 To identify an optimum pan-sharpening method by self-evaluation and the users' requirement with SAW technique;

1.2.3 To suggest an optimum pan-sharpening method for agriculture, forestry, and urban applications.

1.3 Scope and limitation of the study

1.3.1 The existing pan-sharpening methods under ERDAS Imagine and ENVI software including (1) Brovey transformation (BT), (2) Multiplicative transformation (MT), (3) Principal Component Analysis (PCA), (4) IHS transformation (IHST), (5), Modified IHS transformation (MIHST) (6) Wavelet transformation (WT), (7) High Pass Filtering (HPF), (8) Ehlers fusion (EF), and (9) Gram-Schmidt pan-sharpening (GS) were selected and used in this study.

1.3.2 Criteria for image quality measurements used in this study consisted of (1) visual image analysis, (2) edge detection analysis, (3) quality indices, and (4) effect on classification accuracy.

1.3.3 An optimum pan-sharpening method by self-evaluation was performed using SAW technique with equal weight.

1.3.4 An optimum pan-sharpening method based on users' requirement was conducted using SAW technique with weighting from experts in three applications.

1.3.5 Selecting the testing areas in this study was considered based on feature extraction from the existing land use data in 2011, Land Development Department (LDD) and the availability of Thaichote data. Two representative testing areas for agriculture, forestry, and urban application in Nakhon Ratchasima province were displayed in Figure 1.1.

1.3.6 Positional error of pan-sharpening image according to sensor model and its geometric correction was minimized by orthorectification.



Figure 1.1 Major land use types in Nakhon Ratchasima province and specific testing areas.

1.4 Testing areas

1.4.1 Background

The testing areas, which include two testing areas for each application: agriculture, forestry and urban were selected by considering the recent land use data in 2011 of LDD. The dataset was produced by visual interpretation of the available remotely sensed imagery such as Landsat, SPOT, and Thaichote. The classification

accuracy of major land use classes including urban and built-up area, agricultural land, forest land, water body, and miscellaneous land was acceptable in the study.

In practice, the major land use classes of LDD dataset with 75 percent coverage: urban and built-up area, agricultural land and forest land associated with each specific application were considered to allocate the specific testing areas. For example, testing area for agriculture application should have agricultural land more than 75 percent. In this study, testing areas for agriculture and forestry applications are located in Pak Chong district while urban application testing areas are situated in Mueang Nakhon Ratchasima district as shown Figure 1.2 and 1.3 respectively.

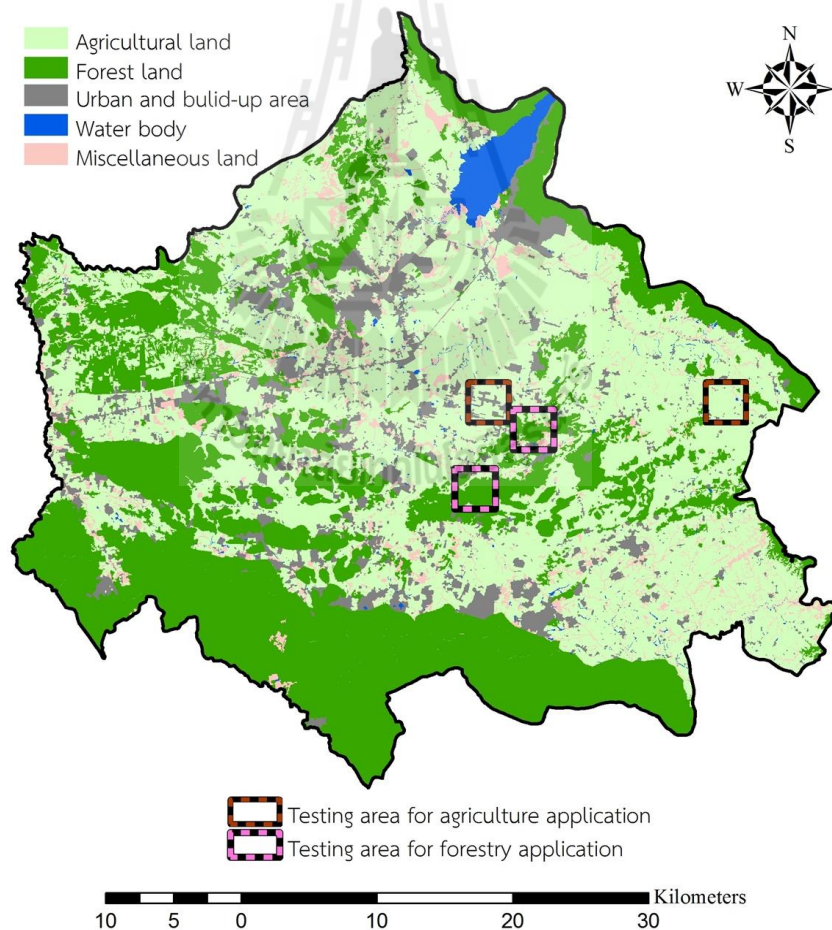


Figure 1.2 Major land use types in Pak Chong district and testing areas for agriculture and forestry applications.

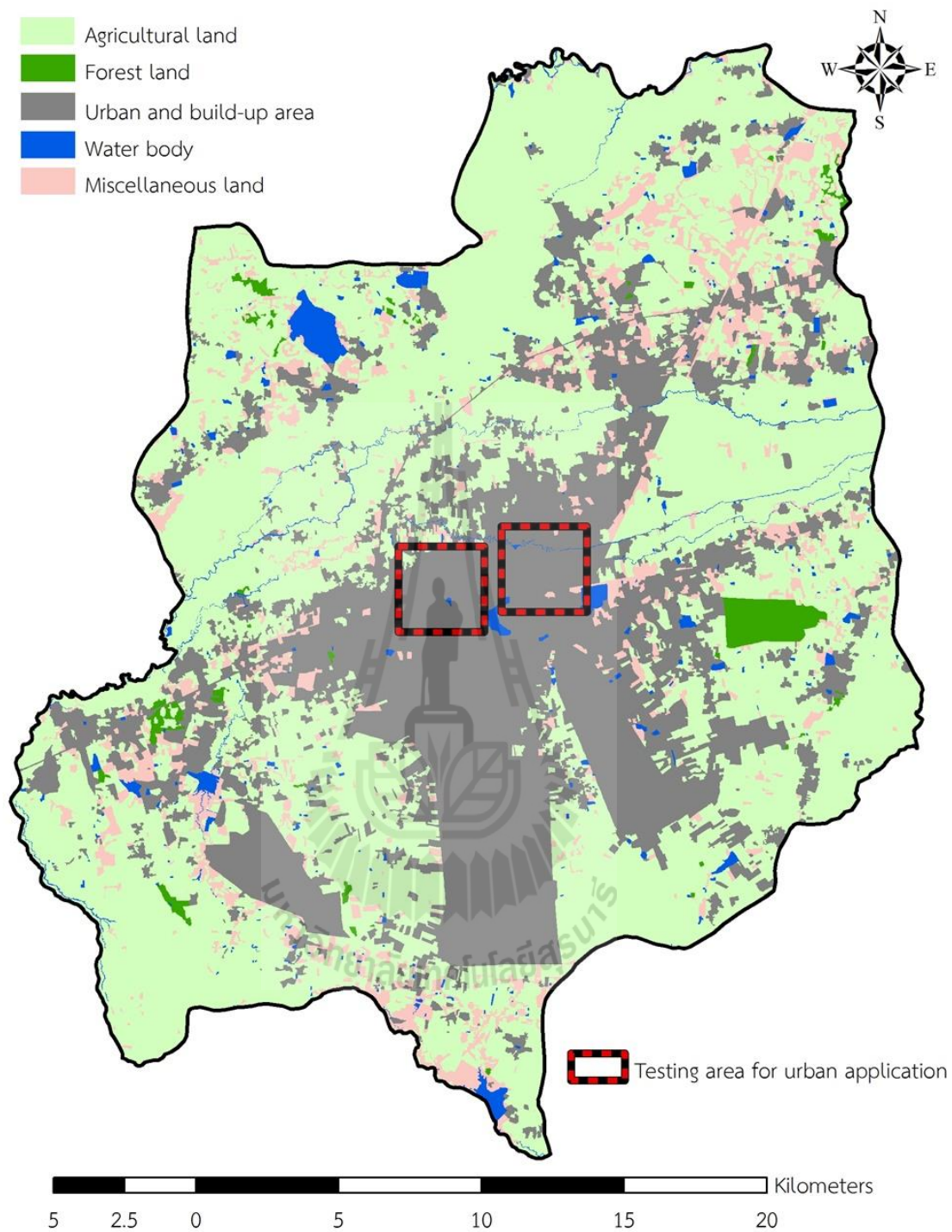


Figure 1.3 Major land use type in Mueang Nakhon Ratchasima district and the testing areas for urban application.

1.4.2 Characteristic of testing areas for agriculture application

Two testing areas for agriculture application which cover with 70 percent of agricultural land were displayed as a true color composite of Thaichote image with band 1, 2, 3 (RGB) in Figure 1.4. The size of land parcels for agricultural use in testing area 1 (Figure 1.4a) is rather smaller than the testing area 2 (Figure 1.4 (b)). Details for agricultural activities in both testing areas are summarized in the following section.

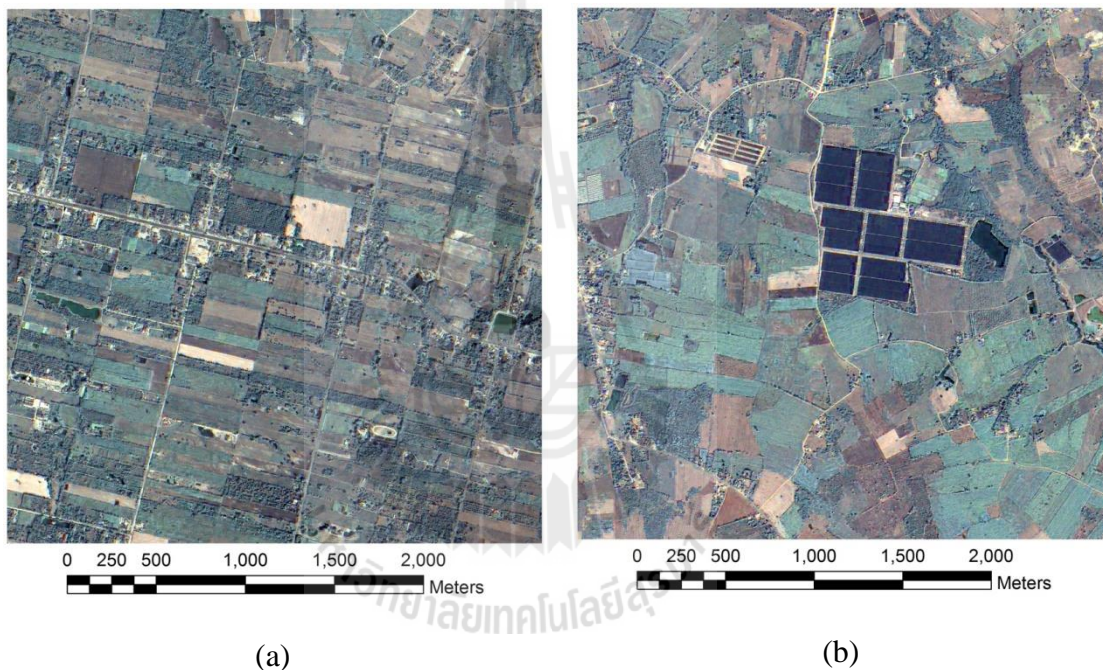


Figure 1.4 Testing areas for agriculture application: (a) testing area 1 (A1), and (b) testing area 2 (A2).

For testing area 1 of agricultural application, the prominent agricultural uses consist of field crop e.g. sugarcane, maize, and cassava, perennial trees, orchard, horticulture, pasture, and farmhouse, which cover 48.23, 1.28, 14.03, 1.22, and 5.23% of the agricultural area respectively (Figure 1.5).

For testing area 2, the dominant agricultural uses consist of paddy field, field crop (sugarcane, maize, and cassava), perennial trees, orchard, horticulture, pasture and farmhouse, and aquaculture land use, which cover 0.16, 59.44, 2.70, 10.25, 10.87, and 6.18% of agricultural area respectively (Figure 1.6).

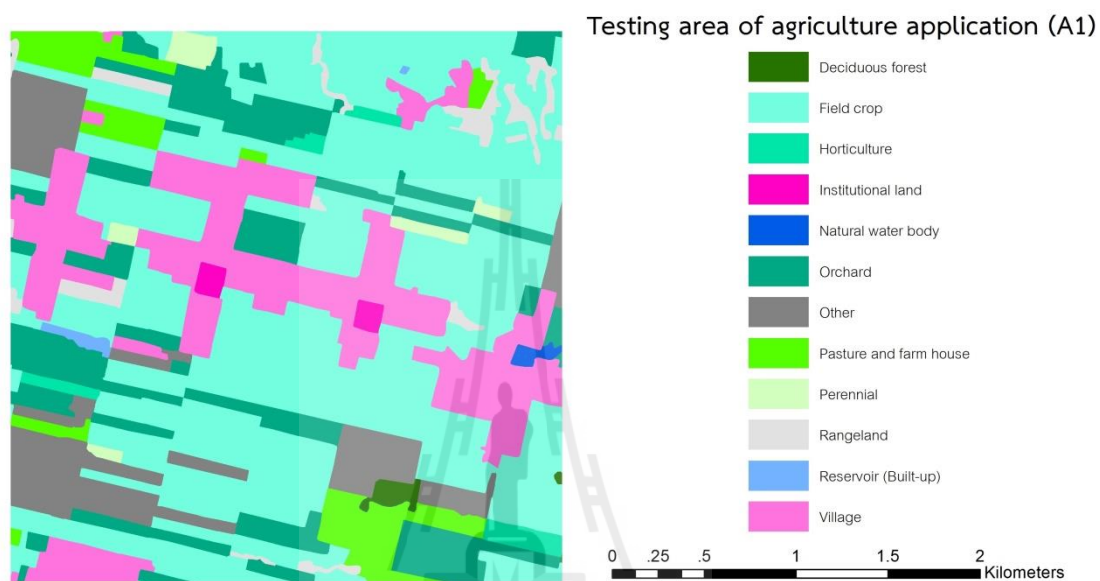


Figure 1.5 Distribution of land use types in testing area 1 (A1) for agriculture application.

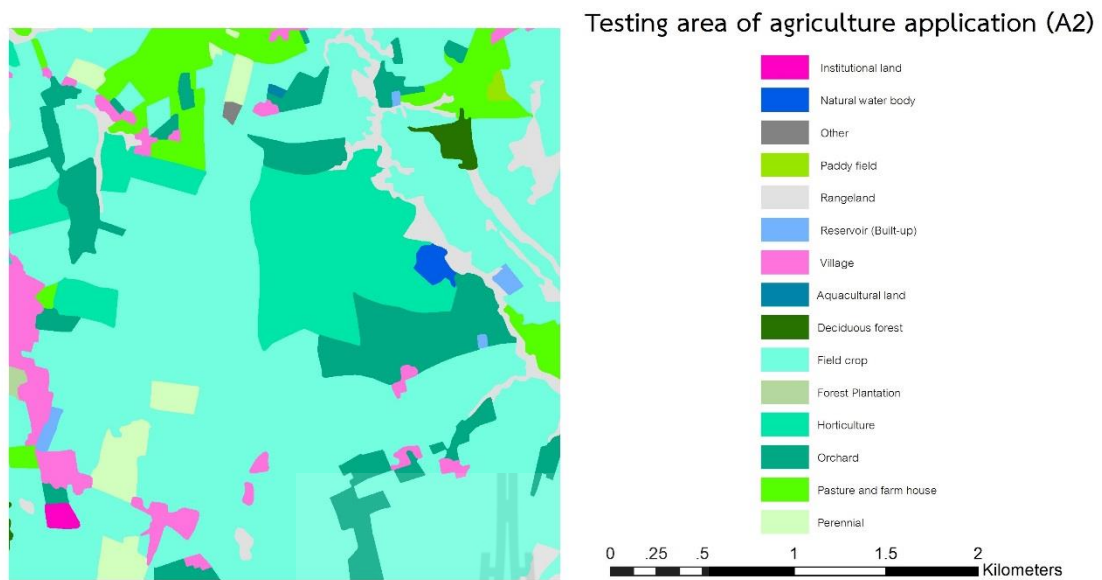


Figure 1.6 Distribution of land use types in testing area 2 (A2) for agriculture application.

1.4.3 Characteristic of testing areas for forestry application

Two testing areas for forestry application which contain 70 percent of natural forest and rangeland were displayed as a true color composite of Thaichote with band 1, 2, 3 (RGB) in Figure 1.7.

The final product of Thaichote pan-sharpened image was used to select two testing areas. Deliberately, these two testing areas cover some parts of Khao Yai national park in order to monitor the deforestation from human activities as shown in Figure 1.7 (a) and (b). All of natural forest lands in both testing areas were deciduous forest. Details for main land use in both testing areas are separately described in the next section.

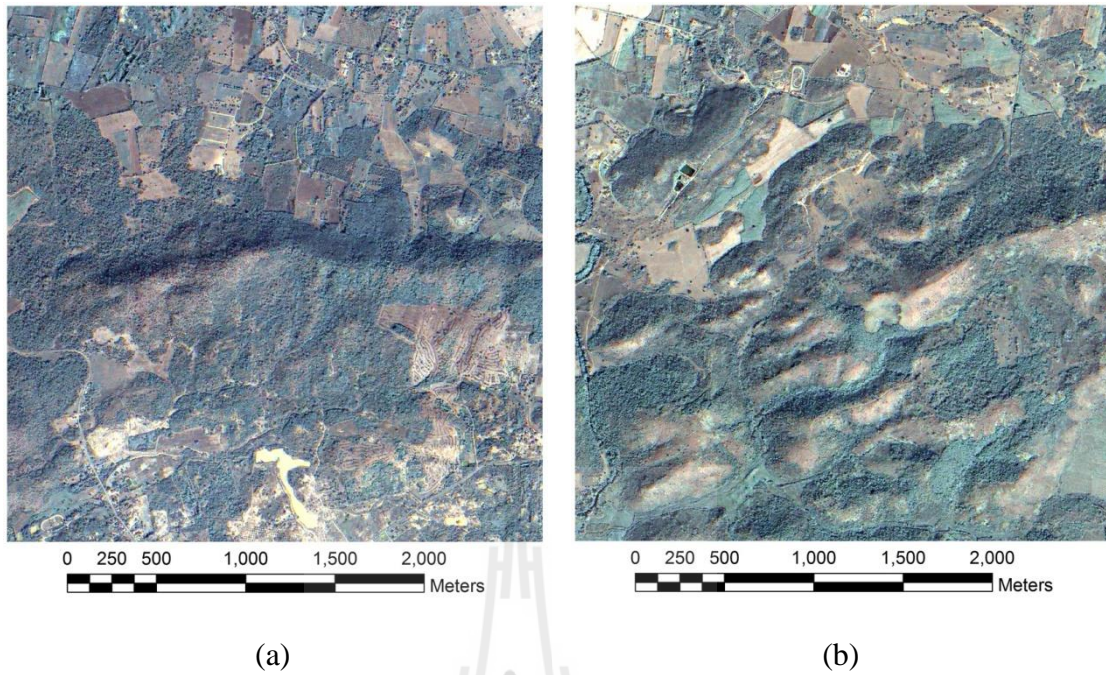


Figure 1.7 Testing areas for forestry application: (a) testing area 1 (F1) and (b) testing area 2 (F2).

For testing area 1 of forestry application, the major land use types consist of natural forest, rangeland and mixed perennial trees, and orchard which cover 50, 11, and 10% of the forestry area respectively (Figure 1.8). The main existing forest area is surrounded by variety of land uses employed by human activities.

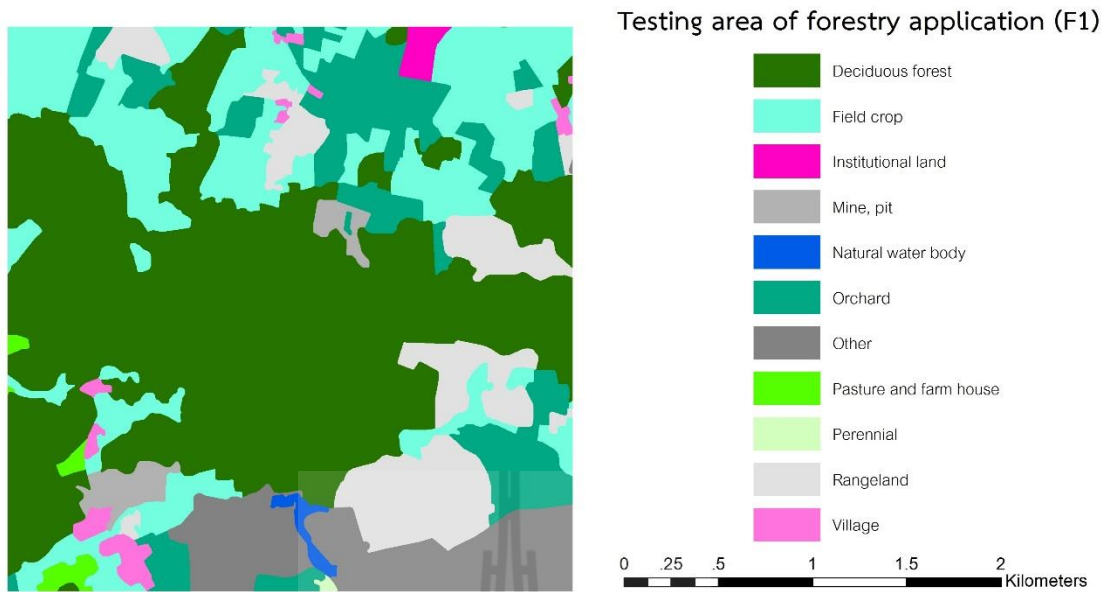


Figure 1.8 Distribution of land use types in testing area 1 (F1) for forestry application.

For testing area 2, the main land use type is natural forest (Deciduous forest) covers area of 71%. In addition, there have varieties of land use such as field crop and orchard nearby the main existing forest area (Figure 1.9).

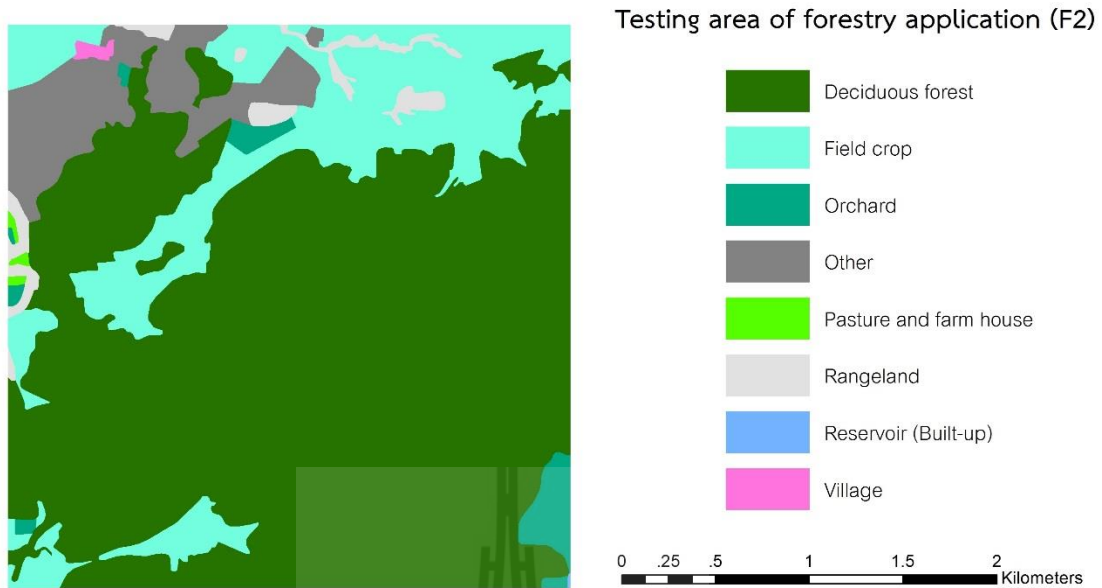


Figure 1.9 Distribution of land use types in testing area 2 (F2) for forestry application.

1.4.4 Characteristic of testing areas for urban application

Two testing areas for urban application which situated in Mueang Nakhon Ratchasima district were displayed as a true color composite of Thaichote data with band 1, 2, 3 (RGB) in Figure 1.10. Most of testing area 1 (Figure 1.10a) covers Central Business District of Nakhon Ratchasima province and institutional land meanwhile testing area 2 (Figure 1.10b) consists of different classes of urban and built-up areas such as city, town, and commercial, institutional, industrial, and some agricultural lands.

The distribution of urban and built-up area types for testing area 1 and 2 was displayed in Figure 1.11 and Figure 1.12 respectively. The most dominant type of urban and built-up area in both testing areas is city, town, and commercial land which cover area of 76 and 88% of the testing area respectively.

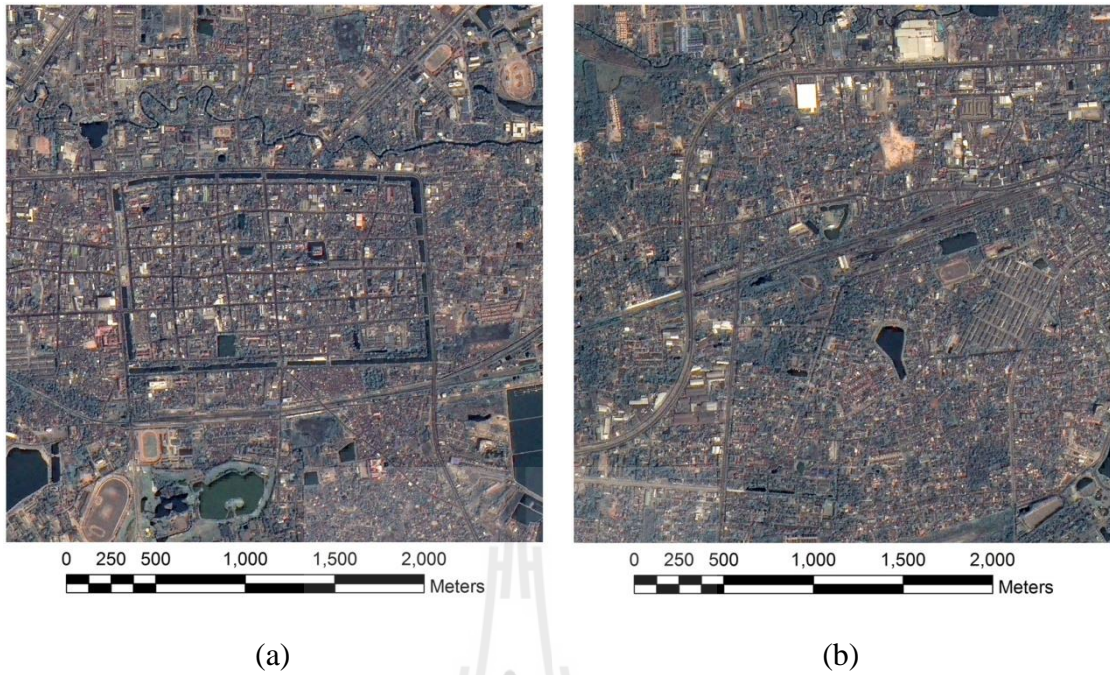


Figure 1.10 Testing areas for urban application: (a) testing area 1 (U1) and (b) testing area 2 (U2).

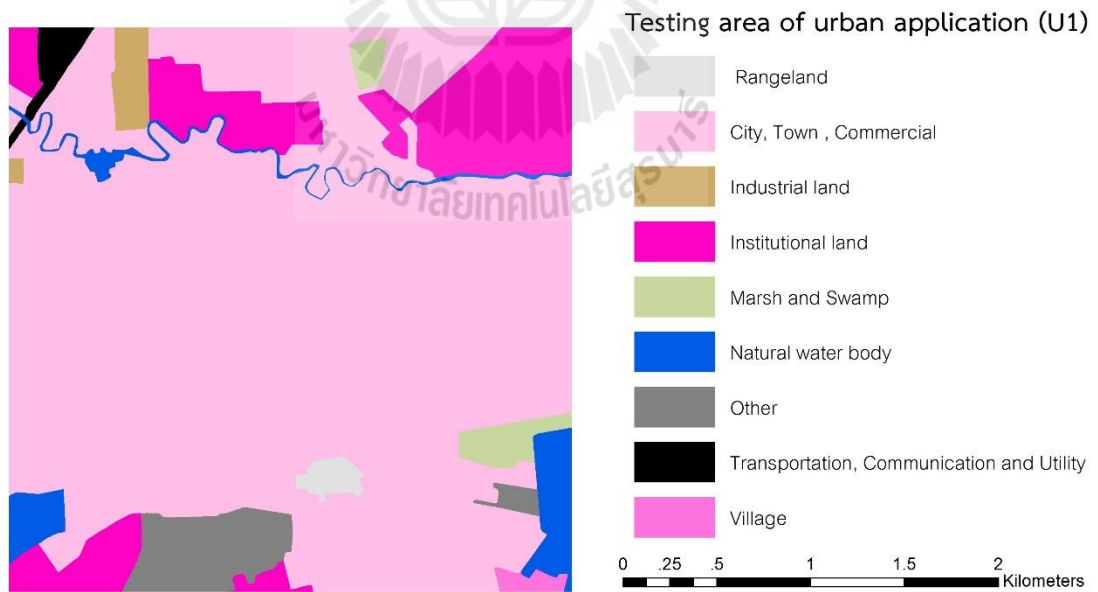


Figure 1.11 Distribution of land use types in testing area 1 (U1) for urban application.



Figure 1.12 Distribution of land use types in testing area 2 (U2) for urban application.

1.5 Benefit of the study

1.5.1 Comprehensive understanding about Thaichote image pan-sharpening procedure including processing methods and image quality evaluation.

1.5.2 Knowledge on optimum Thaichote pan-sharpening method by self-evaluation and the users' requirement for three applications (agriculture, forestry, and urban).

1.5.3 To accomplish an appropriate resampling technique for Thaichote pan-sharpening process.

CHAPTER II

BASIC CONCEPTS AND LITERATURE REVIEWS

Basic concepts including (1) technical specification of Thaichote satellite imagery, (2) pan-sharpening methods, (3) image resampling methods, (4) image quality evaluation, and (5) decision process, simple additive weighting, and relevant literatures with synthesis are reviewed in this chapter.

2.1 Technical specification of Thaichote satellite imagery

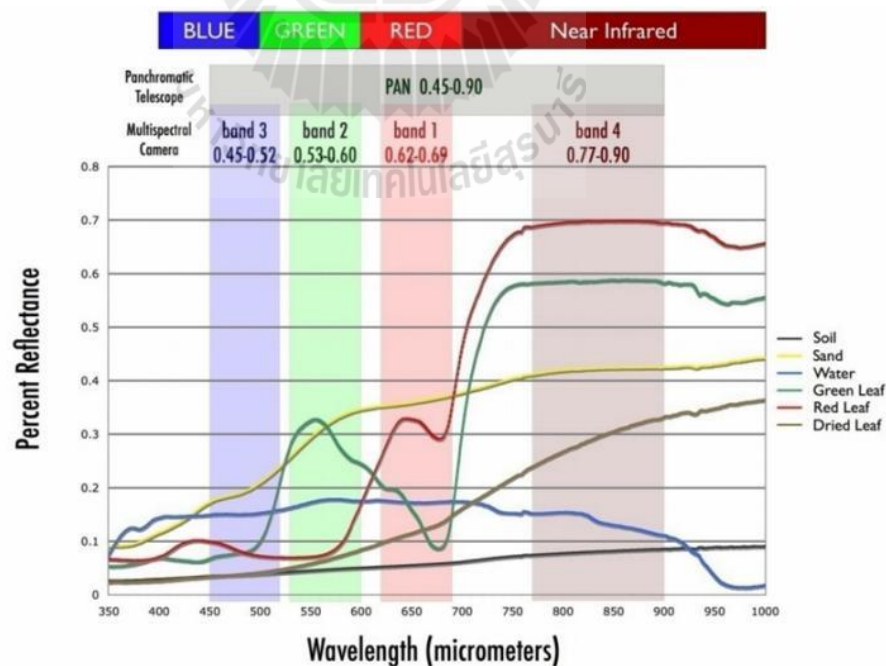
Thaichote, also known as THailand Earth Observation Satellite - THEOS, is the first medium-sized satellite of Thailand. It was launched into the orbit since 1 October 2008. This satellite is a sun-synchronous orbit with 822 kilometers height from the earth surface. The main mission is to provide Thailand and international community with geo-referenced image products for various applications related to natural resources, environmental and security issues (Gaoxiang, Kaewmanee, and Bignone, 2009).

The Thaichote sensors produce high spatial resolution satellite imagery at 2 meters in panchromatic (PAN) mode and 15 meters in multispectral (MS) mode with spectral range of 0.45 - 0.90 μm . The spectral sensor characteristics of Thaichote are summarized in Table 2.1 and Figure 2.1.

Table 2.1 Thaichote spectral sensor characteristics.

Spectral sensor	Panchromatic	Multispectral
Characteristic	(PAN)	(MS)
Spatial Resolution at nadir (m)	2	15
Pixel/Line (Number of CCD)	12,000	6,000
Swath width (km)	22	90
Spectral range (μm)	0.45-0.90	Band 1: 0.62-0.69 (Red) Band 2: 0.53-0.60 (Green) Band 3: 0.45-0.52 (Blue) Band 4: 0.77-0.90 (NIR)
Radiometric resolution	8 bit (256 levels)	8 bit (256 levels)

Source: GISTDA (2009).

**Figure 2.1** Thaichote spectral sensor characteristics.

Source: GISTDA (2009).

2.2 Pan-sharpening methods

In this study, relevant pan-sharpening methods consists of Brovey transformation, Multiplicative transformation, Intensity-Hue-Saturation transformation, Modified Intensity-Hue-Saturation transformation, Principal Component Analysis, Wavelet transformation, High Pass Filtering, Ehlers fusion, and Gram-Schmidt pan-sharpening. Details of these methods are here theoretical reviewed.

2.2.1 Brovey transformation (BT)

Brovey transformation (BT) method is used to combine the values of Digital Number (DN) in PAN and MS image. The result from the process provides a higher spatial resolution of MS image. The MS image is normalized and each band of the combined MS image obtained by multiplication of the normalized MS bands with the PAN image (Vijayaraj, 2004). The Brovey transformation can be expressed as:

$$DN_{fused}(bi) = \frac{DN(bi)}{DN(b1)+DN(b2)+\dots+DN(bn)} * DN(pan), \quad (2.1)$$

where DN is a digital number of that particular band, (bi) is a particular band of the MS image, and (pan) is a band of PAN image.

2.2.2 Multiplicative Transformation (MT)

The Multiplicative transformation method is computed by a simple multiplication of digital number of MS image and PAN image. This process is widely used to produce a pan-sharpened image. The advantage of this algorithm is straightforward and simplify because it is multiply the same information from PAN image into all bands of MS images (Klonus and Ehlers, 2009). However, the resulting

merged image does not retain the radiometry of the input MS image (Hely, Nasr, and Taweel, 2010). The Multiplicative transformation can be expressed as:

$$DN_{fused}(bi) = DN(bi) * DN(pan), \quad (2.2)$$

where DN is a digital number of that particular band, (bi) is a particular band of the MS image, and (pan) is band of PAN image.

2.2.3 Intensity-Hue-Saturation transformation (IHST)

The IHST method is a process for converting a color image from the Red, Green, and Blue (RGB) color space (MS image) into the IHS color space. An intensity (I) component is replaced by a high-resolution PAN image in the combination process. A reverse IHS transform is then performed with the hue (H) and saturation (S) components to produce a pan-sharpened image (Zhang, 2004). However, the limitation of the method is only suitable to a three bands MS image (Du, Younan, King, and Shah, 2007). The IHST process shows in Figure 2.2 and the descriptive procedures are explained below.

Step 1: To resample the low spatial resolution MS image to the size of the high spatial resolution PAN image.

Step 2: To convert RGB to IHS color space by a following equation:

$$\begin{bmatrix} I \\ v1 \\ v2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ -\sqrt{2}/6 & -\sqrt{2}/6 & \frac{2\sqrt{2}}{6} \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Step 3: To replace intensity image (I) by a PAN image.

Step 4: To revert IHS to RGB color space as a following equation:

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PAN \\ v1 \\ v2 \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

where R , G , B , $v1$, and $v2$ represent corresponding values in the original RGB image, and R' , G' , and B' are corresponding values in the fused images.

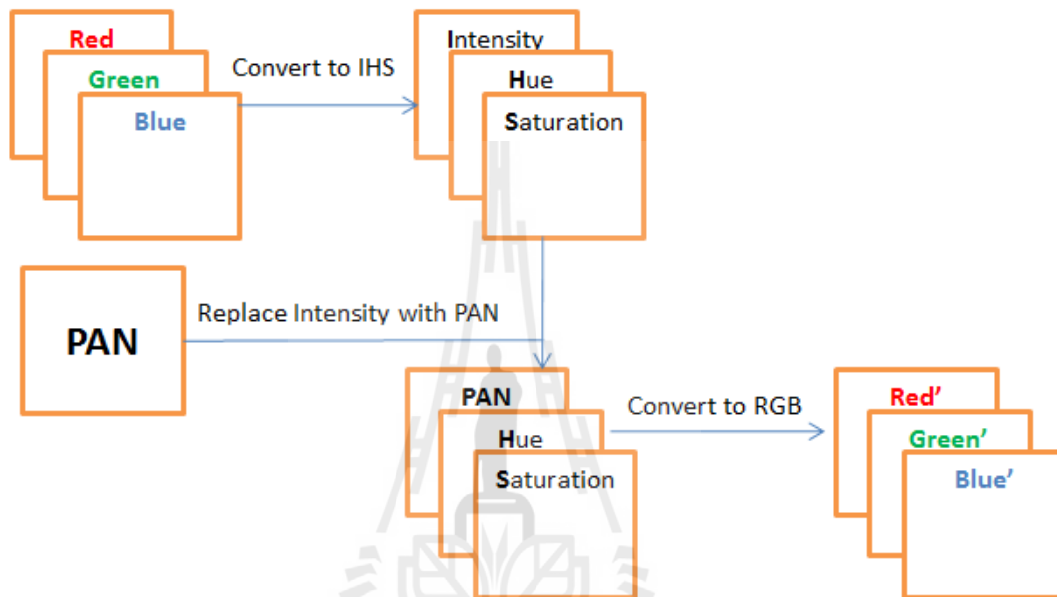


Figure 2.2 Workflow of Intensity-Hue-Saturation transformation (IHST).

2.2.4 Modified IHS transformation (MIHST)

According to the limitation of IHS transformation, this technique can process only three MS bands at a time. Therefore, Siddiqui (2003) proposed the modified IHS transformation method for combining three or more MS bands. The MIHST method is performed by the following procedures.

Step 1: To resample the low spatial resolution MS image to the size of the high spatial resolution PAN image,

Step 2: To convert RGB to IHS color space by following equations:

$$\begin{bmatrix} I \\ v1 \\ v2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/2 & -1/2 & 1 \\ \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$H = \begin{cases} 0 & \text{if } v1 = 0 \text{ and } v2 = 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{v2}{v1}\right) + 2\pi & \text{if } v1 \geq 0 \text{ and } v2 < 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{v2}{v1}\right) & \text{if } v1 \geq 0 \text{ and } v2 \geq 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{v2}{v1}\right) + \pi & \text{if } v1 < 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

and

$$S = \sqrt{v1^2 + v2^2}. \quad (2.7)$$

Step 3: To revert to RGB color space

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/3 & 1/\sqrt{3} \\ 1 & -1/3 & -1/\sqrt{3} \\ 1 & 2/3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ v1 \\ v2 \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

and

$$v1 = S \cos(H), \quad (2.9)$$

and

$$v2 = S \sin(H), \quad (2.10)$$

where R , G , B , $v1$, and $v2$ represent corresponding values in the original RGB image, and R' , G' , and B' are corresponding values in the fused images.

2.2.5 Principal Component Analysis (PCA)

PCA transformation is exercised to compress the information content of several bands of satellite image into two or three transformed principal component images. The first principal component of the PCA transform of the MS image is usually replaced by the high spatial resolution PAN image. Through a reverse PCA

transformation, the PAN image combines with the low spatial resolution MS bands (Shettigara, 1992). Workflow of this method is shown in Figure 2.3.

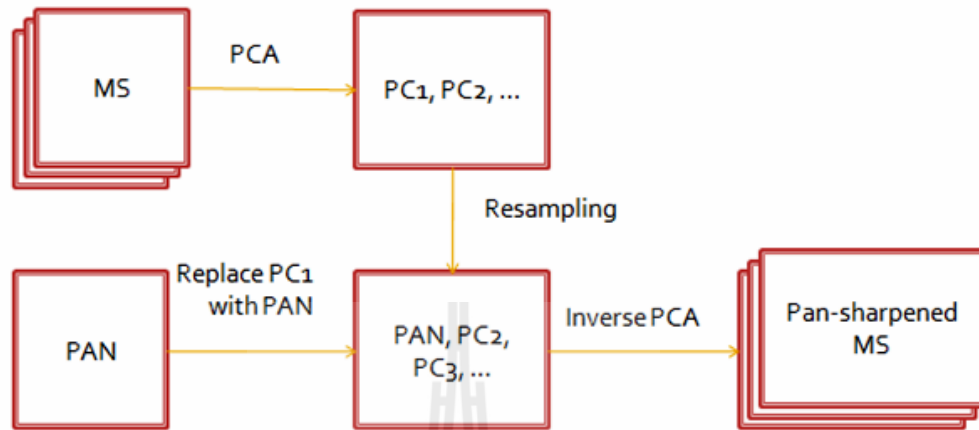


Figure 2.3 Principal Component Analysis (PCA) pan-sharpening workflow.

Source: Vijayaraj (2004).

2.2.6 Wavelet transformation (WT)

The wavelet transformation method is based on the wavelet decomposition of images. There is a process that separating original image into different components which considering their local frequency content. Generally, original image was performed by the Discrete Wavelet Transforms (DWT) on MS and the PAN images to extract the low frequency data from the MS image and the high frequency data from PAN image. These components are combined to create the fused wavelet coefficient map. The inverse wavelet transformation is performed on the fused map to create the final pan-sharpened image (Strait, Rahmani, and Markurjev, 2008). The major advantage of the wavelet transformation method is in the minimal distortion of the spectral characteristics of the data while as the visual comparison indicated the wavelet method results with good spatial resolution similar to the IHST method

(Garguet-Duport, Girel, Chassery, and Pautou, 1996). A workflow of wavelet-based methods is depicted in Figure 2.4.

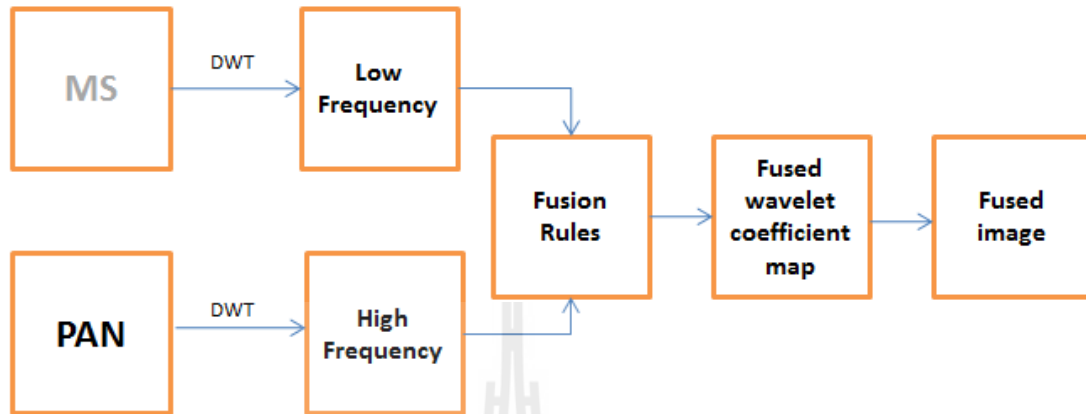


Figure 2.4 Wavelet transformation (WT) pan-sharpening workflow.

Source: Strait, Rahmani, and Markurjev (2008).

2.2.7 High Pass Filtering (HPF)

The High Pass Filtering process involves a convolution using high pass filter on PAN image and merging the result with MS image. The first development of this method aims to reduce data volume and increase the spatial resolution of Landsat MSS data (Carter, 1998). The general process of HPF method can be concluded based on Gangkofner, Pradhan, and Holcomb (2008) in the following steps.

Step 1: To read pixel sizes from image files and calculate scale ratio (R).

Step 2: To apply high-pass filter on the PAN image.

Step 3: To resample the MS image to the pixel size of the high-pass image.

Step 4: To add the HPF image to each MS band. The HPF image is weighted relative to the global standard deviation of the MS band.

Step 5: To stretch the new MS image to match the mean and standard deviation of the original (input) MS image.

The size of the high-pass kernel (HPK) is a function of the relative input pixel sizes (R). Table 2.2 shows how the size of HPK is determined based on R value.

All values of the kernel are set to -1 except the center value. There are three possible values for the kernel center value. The lowest of the three values for each kernel size is the default (Table 2.3).

Table 2.2 HPK size depends on R value.

R value	HPK size
$1 < R < 2.5$	5x5
$2.5 \leq R < 3.5$	7x7
$3.5 \leq R < 5.5$	9x9
$5.5 \leq R < 7.5$	11x11
$7.5 \leq R < 9.5$	13x13
$R \geq 9.5$	15x15

Source: Leica Geosystems Geospatial Imaging (2008).

Table 2.3 Center value options depend on HPK size.

HPK size	Center value		
	Default value	Optional values	
5x5	24	28	32
7x7	48	56	64
9x9	80	93	106
11x11	120	150	180
13x13	168	210	252
15x15	336	392	448

Source: Leica Geosystems Geospatial Imaging (2008).

The weighted value of HPF image applied to PAN image relates to global standard deviation of MS band and it also a function of R . The weighting (W) can be determined by the following formula:

$$W = (SD (MS) / SD (HPF) * M), \quad (2.11)$$

where W is weighting multiplier for HPF image value, $SD (MS)$ is standard deviation (SD) of the MS band to which the HPF image is being added, $SD (HPF)$ is standard

deviation (SD) of the HPF image, and M is modulating factor to determine the crispness of the output image.

This factor is user-adjustable. The Range and default for M based on R are shown in Table 2.4.

Table 2.4 Range and default for M based on R .

R value	M value		
	Minimum	Default	Maximum
$1 < R < 2.5$	0.20	0.25	0.30
$2.5 \leq R < 3.5$	0.35	0.50	0.65
$3.5 \leq R < 5.5$	0.35	0.50	0.65
$5.5 \leq R < 7.5$.050	0.65	1.00
$7.5 \leq R < 9.5$	0.65	1.00	1.40
$R \geq 9.5$	1.00	1.35	2.00

Source: Leica Geosystems Geospatial Imaging (2008).

Finally, the calculation for each band of the input image will then be calculated using the following form,

$$\text{Pixel (out)} = [\text{Pixel (in)}] + [\text{HPF} \times W]. \quad (2.12)$$

2.2.8 Ehlers fusion (EF)

The Ehlers fusion is based on an IHS transformation coupled with a Fourier domain filtering. This technique is extended to include more than 3 MS bands by using multiple IHS transforms until the number of bands is exhausted. A subsequent Fourier transform of the intensity component and the panchromatic image allows an adaptive filter design in the frequency domain. Using Fast Fourier Transform (FFT) techniques, the spatial components to be enhanced or suppressed can be directly accessed. The intensity spectrum is filtered with a low pass filter (LPF) whereas the

panchromatic spectrum is filtered with an inverse high pass filter (HPF). After filtering, the images are then transformed back into the spatial domain with an inverse FFT and added together to form a fused intensity component with the low-frequency information from the low resolution multispectral image. This new intensity component and the original hue and saturation components of the multispectral image form a new IHS image. As the last step, an inverse IHS transformation produces a fused RGB image. These steps can be repeated with successive 3-MS band selections until all bands are fused with the panchromatic image (Ehlers and Klonus, 2010). An overview of Ehlers fusion workflow can be expressed as illustrated in Figure 2.5.

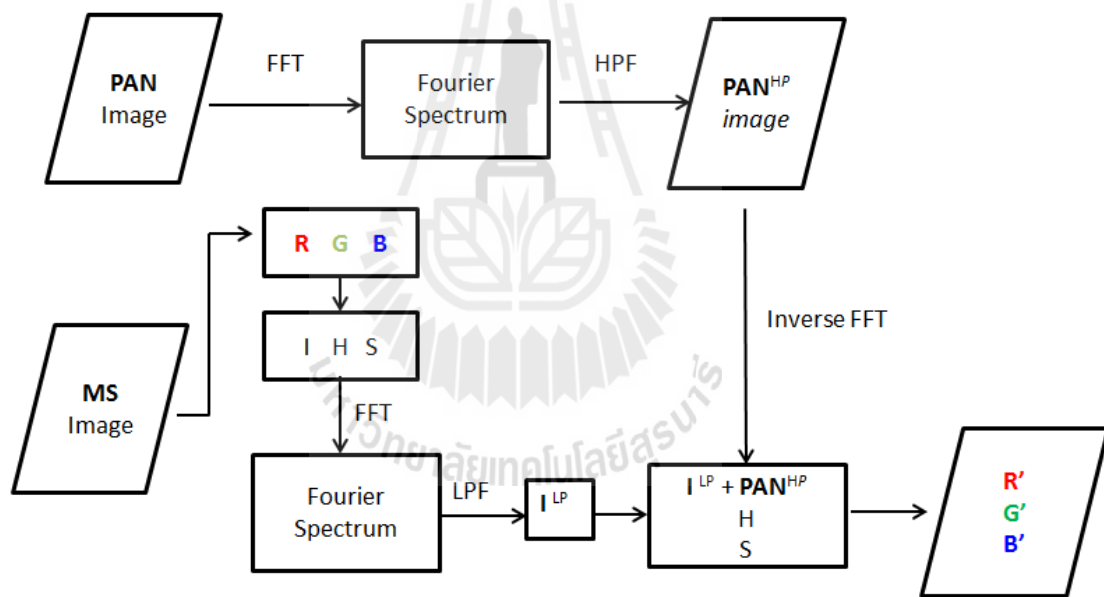


Figure 2.5 Ehlers fusion (EF) workflow.

2.2.9 Gram-Schmidt pan-sharpening (GS)

Based on the abstract of Gram-Schmidt pan-sharpening patented by Laben and Brower in 2000, the spatial resolution of a multispectral digital image is enhanced in a process of the type wherein a higher spatial resolution panchromatic image is merged with a plurality of lower spatial resolution spectral band images. A lower

spatial resolution panchromatic image is simulated and a Gram-Schmidt transformation is performed on the simulated lower spatial resolution panchromatic image and the plurality of lower spatial resolution spectral band images. The simulated lower spatial resolution panchromatic image is employed as the first band in the Gram-Schmidt transformation. The statistics of the higher spatial resolution panchromatic image are adjusted to match the statistics of the first transform band resulting from the Gram-Schmidt transformation and the higher spatial resolution panchromatic image (with adjusted statistics) is substituted for the first transform band resulting from the Gram-Schmidt transformation to produce a new set of transform bands. Finally, the inverse Gram-Schmidt transformation is performed on the new set of transform bands to produce the enhanced spatial resolution multispectral digital image (Laben and Brower, 2000).

In summary, Gram-Schmidt spectral sharpening under ENVI software is implemented in 4 steps as following.

Step 1: Simulating a panchromatic band from the lower spatial resolution spectral bands.

Step 2: Performing a Gram-Schmidt transformation on the simulated panchromatic band and the spectral bands, using the simulated panchromatic band as the first band.

Step 3: Swapping the high spatial resolution panchromatic band with the first Gram-Schmidt band.

Step 4: Applying the inverse Gram-Schmidt transform to form the pan-sharpened spectral bands.

2.3 Image resampling methods

According to the pan-sharpening process, the pixel values of pan-sharpened image are resampled from the original pixel values of MS images. Sachs (2001) explained that the resampling is the mathematical technique used to create a new version of the image with a different width and/or height in pixels, increasing/decreasing the size of an image. There are several widely used image resampling methods as follows:

2.3.1 Nearest neighbor

The new pixel value is derived from the spatially closest pixel value in the original image. The nearest neighbor resampling method is simple and easy to understand. Furthermore, the method does not require complex computation as well.

2.3.2 Bilinear interpolation

The bilinear interpolation method is underpinned by the assumption that pixel value varies linearly from one location to another (Gao, 2008). The new pixel value at the location can be interpolated from four pixels which surrounding a new pixel location and its immediately neighboring pixels through distance-weighted averaging. The resulting image looks smoother than the image which produced from the nearest neighbor method.

2.3.3 Cubic convolution

The cubic convolution method uses the 16 closest pixels surrounding each pixel are needed to interpolate the new pixel value. The output image that performed

by this method seem sharper than the image which generated by bilinear interpolation approach and it also does not have a blocky texture like that produced from nearest neighbor method. However, the method is much more complex and intensive computation because it computed from more surrounding pixels.

2.4 Image quality evaluation

Image quality evaluation is focused on the verification of the preservation of spectral characteristics and improvement of the spatial resolution (Klonus and Ehlers, 2009). In the research of the qualitative and quantitative evaluation involve the comparison of pan-sharpened images with original images. Four criteria for image quality evaluation are separately described as follows:

2.4.1 Visual image analysis (VIA)

The quality of pan-sharpened image can evaluate by human inspection. This is a simple technique to evaluate the image quality at the beginning and it can adapt to a common use without complicated procedure. Nevertheless, it seems depending on different human skills and perception.

In principle, human beings use the fundamental elements of image interpretation include grayscale, tone, color, height, size, shape, shadow, texture, site, association, and arrangement (Jensen, 2007). The elements of image interpretation with qualitative and quantitative attributes are shown in Table 2.5. In this study, the feasible elements are firstly investigated and they use to assess the image quality of each pan-sharpening method. For example, tone/color is used to measure the spectral preservation capability of pan-sharpened image.

Table 2.5 The elements of visual image interpretation.

Element	Common Adjectives (Quantitative and Qualitative)
x, y location	x, y image coordinate/x, y image map coordinate
Tone/Color	Grey tone: light, intermediate, dark Color: IHS and RGB
Size	Length, width, perimeter, area, small, medium, large
Shape	An object's geometric characteristics: linear, curvilinear, circular, elliptical, radial rectangular, triangular, hexagonal etc.
Texture	Characteristic placement and arrangement of repetitions of tone or color
Pattern	Spatial arrangement of an objects on the ground: systematic, unsystematic or random, linear, curvilinear, circular, elliptical, parallel, striated, braided
Shadow	A silhouette caused by solar illumination from the side
Height/Depth	z-elevation or z-bathymetry
Site/Situation/ Association	Site: elevation, slope, aspect, adjacency to water, transportation, utilities Situation: objects are placed in a particular order or orientation relative to one another Association: related phenomena are usually present

Source: Jensen (2007).

2.4.2 Edge detection analysis (EDA)

Edge detection analysis is here applied to assess the images statistics of pan-sharpened images under the digital image processing. This evaluation is aim to measure the performance of edge information extraction from pan-sharpened images. In principle, spatial convolution filters are adopted to find the discrepancy of edge between original PAN image and pan-sharpened image. The information in original PAN images and pan-sharpened image are firstly enhanced and then they are compared to find the deviation using correlation coefficient (CC). The result is used to illustrate the spatial structure preservation.

In this study, two main widely used spatial filters (operators) for edge information extraction Sobel and Laplacian are here examined for pan-sharpening evaluation.

(1) Sobel operator

Sonka, Hlavac, and Boyle (2008) stated that the Sobel operator is often used as a simple detector of horizontality and verticality of edges as kernel convolution or mask. If the $h1$ response is y and the $h2$ response x , then it can derive edge strength (magnitude). The sample of Sobel operator as mask form can be written as shown in Figure 2.6.

$$h1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}; \quad h2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Figure 2.6 Characteristics of mask and its coefficient of Sobel operator.

Source: Sonka, Hlavac, and Boyle (2008).

(2) Laplacian operator

The Laplacian, or linear differential operator, was described by Rosenfeld and Kak (1982) as:

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}, \quad (2.13)$$

where x is the angle (in radians) from the x axis to the point (x, y) , y is the angle (in radians) from the y axis to the point (x, y) , and f is a function (image) $f(x, y)$ of two variables.

According to the derivative of any order are linear operations, it can assume the Laplacian as a linear operator. However, it needs to express the equation as a discrete form for implementing this technique to digital image processing. Gonzalez and Woods (2001) described that the two dimension Laplacian can be derived by taking the difference in x and y direction. The notation for partial second-order derivative in x direction can be shown as:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial^2 x^2} = f(x + 1, y) + f(x - 1, y) - 2f(x, y), \quad (2.14)$$

and the partial second-order derivative in y direction can be expressed as:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial^2 y^2} = f(x, y + 1) + f(x, y - 1) - 2f(x, y). \quad (2.15)$$

The implementation of two-dimensional Laplacian is derived by summing these two components as:

$$\nabla^2 f = [f(x + 1, y) + f(x - 1, y) + f(x, y + 1) + f(x, y - 1)] - 4f(x, y). \quad (2.16)$$

A sample of spatial filter kernel which adopted the two-dimensional Laplacian as mask form can be written as shown in Figure 2.7.

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

Figure 2.7 Characteristics of mask and its coefficient of Laplacian operator.

Source: Gonzalez and Woods (2001).

2.4.3 Quality indices (QI)

Several quantitative measures have been suggested for determining the degree to which the spectral properties of the multispectral bands have been degraded in the pan-sharpening process (Siddiqui, 2003). The quality index approach is frequently used to measure the performance of pan-sharpened images; the spatial and spectral qualities are the main components for consideration. Spatial quality looks easier to consider by the sharpness or texture of an object in pan-sharpened image. However, the spectral quality is much more complicate to assess because it is quite difficult to measure retaining spectral information in original MS image by visual

interpretation. Therefore, quality indices are frequently used to evaluate image quality of pan-sharpening product. The widely used quality indices are as follows:

(1) Root mean square error (RMSE)

The RMSE index gives an idea of the amount of distortion induced by each method (Parcharidis and Kazi-Tani, 2000). The computation of this index is made on the mean squared error between original MS image and pan-sharpened image, then

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(f_i - f'_i)^2}{mn}}, \quad (2.17)$$

where m and n are number of pixels, f_i and f'_i represent the corresponding pixel value of MS image and pan-sharpened image.

(2) Correlation coefficient (CC)

The CC index is based on Pearson's correlation that expresses the degree to which the DN is related, then

$$CC(f_i, \bar{f}_i) = \frac{\sum(f_i - \bar{f}_i)(f'_i - \bar{f}'_i)}{\sqrt{(\sum(f_i - \bar{f}_i)^2)(\sum(f'_i - \bar{f}'_i)^2)}}, \quad (2.18)$$

where f_i and \bar{f}_i represent the corresponding pixel value of MS image and pan-sharpened image.

(3) Relative shift of the mean (RM)

The RM index is the statistical comparison. The simple arithmetic means of each band were calculated in order to represents the spectral deviation of the pan-sharpened images, then

$$RM = \frac{OutputMean - OriginalMean}{OriginalMean} \%, \quad (2.19)$$

where *OriginalMean* is the mean of MS image and *OutputMean* is the mean of pan-sharpened image.

(4) Relative average spectral error (RASE)

The RASE index characterizes the average performance of the method of image fusion in the spectral bands considered (Choi, 2006), then

$$RASE = \frac{100}{M} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N RMSE^2(Bi)}, \quad (2.20)$$

where M is the mean radiance of MS image, N is the number of bands, and (Bi) is the different between MS image and pan-sharpened image.

(5) Relative dimensionless global error in synthesis (ERGAS)

The ERGAS index is sensitive to mean shifting and dynamic range change (Du, Younan, King, and Shah, 2007) and offers the global view of the quality of the pan-sharpened image, then

$$ERGAS = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[\frac{RMSE(n)}{mean(n)} \right]^2}, \quad (2.21)$$

where h and l are spatial resolution of PAN and MS images respectively, n is the different between MS image and pan-sharpened image, and N is the number of bands.

(6) Spectral angle mapping (SAM)

The concept of SAM can expressed as a following equation.

$$Cos \alpha = \frac{\sum_{i=1}^N v \hat{v}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N v^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N \hat{v}^2}}, \quad (2.22)$$

where N is the number of bands, $v = (v_1, v_2, \dots, v_N)$ and $\hat{v} = (\hat{v}_1, \hat{v}_2, \dots, \hat{v}_N)$ are two spectral pixel vector with the same bands of MS image and pan-sharpened image, respectively, and α is a spectral angle at specific point in radian (Figure 2.8).

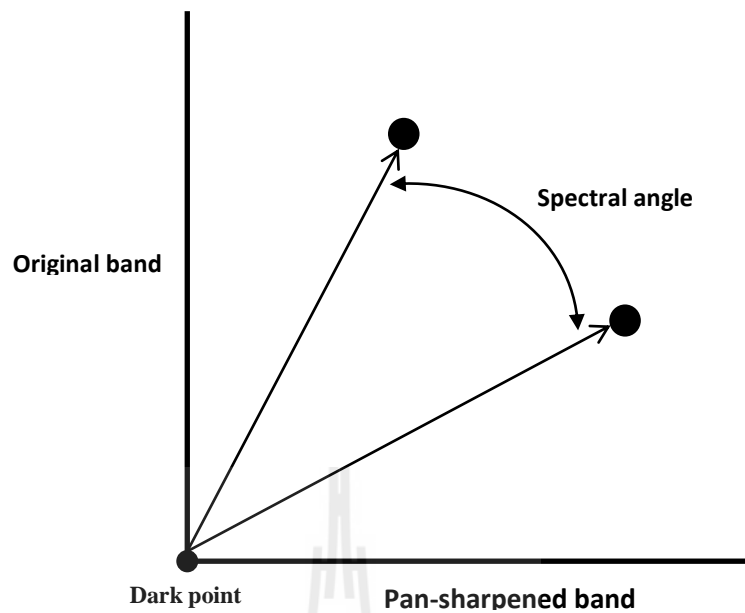


Figure 2.8 Spectral Angle Mapping (SAM).

(7) Universal Image Quality Index (UIQI)

The universal image quality index was developed by Wang and Bovik (2002). It can be regarded as one of the mathematical methods. In comparison to the above-mentioned methods it is simple and straightforward.

With the original image $x = [x_i | i = 1, 2, \dots, N]$ and the test image $y = [y_i | i = 1, 2, \dots, N]$ the universal image quality index (*UIQI*) is defined as follows:

$$UIQI = \frac{4\sigma_{xy}\bar{x}\bar{y}}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)[(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2]}, \quad (2.23)$$

where $\bar{x} = \sum_{i=1}^N x_i$, $\bar{y} = \sum_{i=1}^N y_i$, $\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$,

$\sigma_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$, and $\sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$

The dynamic range of *UIQI* is $[-1,1]$. The best achievable value is consequently 1 whenever $y_i = x_i$, i.e. the original image and the test image are identical. *UIQI* can be rewritten as a combination of three factors:

$$UIQI = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} * \frac{2\bar{x}\bar{y}}{(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2} * \frac{2\sigma_x \sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}. \quad (2.24)$$

The first factor in the equation gives the correlation coefficient of x and y . This factor measures the degree of linear agreement and in the ideal case (two images are identical) is thus = 1 and if there is no correlation then = 0. The second factor compares the means of the two images. The range of values is between 0 and 1. The third factor finally examines the variance of the two images. In this case the dynamic range is also [0, 1]. In conformity with the correlation, mean value and variance, these three factors provide a value of 1 and thus *UIQI* is also equal to 1.

2.4.4 Effect on classification accuracy (ECA)

Li and Li (2010) proposed a new procedure for pan-sharpening quality assessment by evaluating the effect of fusion on image classification. In this study, ISODATA clustering classification are applied for land use extraction in three study areas (agriculture, forestry, and urban) from pan-sharpened images and the derived results are then used to evaluate the effect on classification accuracy using overall accuracy and Kappa hat coefficient of agreement based on land use data in 2011 of LDD and field survey in 2013.

2.5 Decision process and Simple Additive Weighting

Simon (1960) mentioned that the decision making process can be categorized into three phases: intelligence; the recognition of decision problem, design, related to develop and analysis a set of possible solutions; and choice which involved the evaluation of an alternatives. The decision making process can be displayed as shown in Figure 2.9.

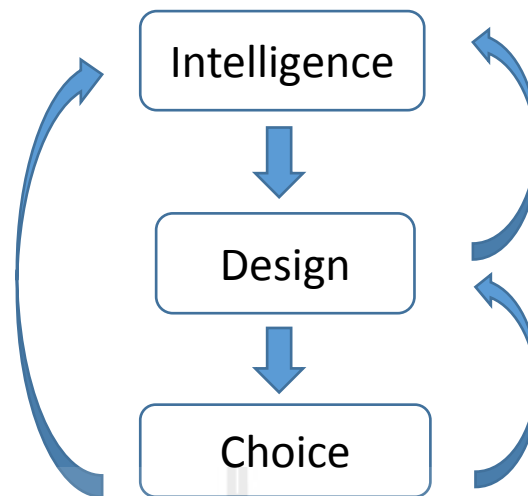


Figure 2.9 Three phases of decision making process.

Source: Malczewski (1999).

In general, decision maker has a lot of useful information for making a decision. It is important to have an advance technique to handle their information. One interesting technique is Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) which is a set of procedures for analysis of complex decision problems involving non-commensurable, conflicting criteria on the basis of which alternative decisions are evaluated (Malczewski, 1999).

2.5.1 Simple additive weighting (SAW)

Malczewski (1999) explained the simple additive weighting (SAW) is the most often used technique for tackling spatial multi-attribute decision making. This technique is also referred to Weighted Linear Combination (WLC) or Scoring methods. In this method, the decision maker assigns the relative importance, or score, to each attribute directly. A total score is derived from multiplying a weight of each attribute with the relative importance to the alternative on those attribute. The highest

score of each decision alternatives will be chosen. The SAW decision rule can be written as following form:

$$A = \sum_j w_j x_{ij} , \quad (2.25)$$

where A is total score which obtained by multiplying the score and weight, x_{ij} is the score of the i^{th} alternative with respect to the j^{th} attribute, w_j is a normalized weight.

2.5.2 Questionnaire

Dornyei (2003) described “the essence of scientific research is trying to find answers to questions in a systematic manner and the asking question is one of the most natural ways of gathering information”. He also mentioned the typical questionnaire is a highly structured data collection instrument, with most items either asking about very specific pieces of information. This makes questionnaire data particularly suited for statistical analysis. Similarly, Brown (2001) defined the definition of questionnaire are “any written instruments that present respondents with a series of questions or statements to which they are to react either by writing out their answers or selecting from among existing answers”.

The main advantages of questionnaires are their unprecedented efficiency in term of researcher time, research effort and financial resource. In addition, researchers can collect a huge amount of information using a questionnaire and questionnaire also provides an additional requirement or specific information from stakeholders, especially government officers, remotely sensed data users and experts.

2.6 Literature reviews

Parchaidis and Kazi-Tani (2000) had utilized 3 statistical parameters: included correlation coefficient, mean, and root mean square error in order to analysis the 4 pan-sharpening methods including PCA, IHST, BT, and MT with LANDSAT TM and radar SAR: ERS-1 images. According to the experimental results, MT is the method distorting the least in both the original images. Paradoxically, MT is the method distorting the most radar data but the distortion is acceptable since it has a high correlation coefficient with radar data. Moreover, none of the three remaining methods have succeeded to merge Landsat TM as the MT. PCA, IHST and BT present almost the same results without significant differences.

Du, Younan, King, and Shah (2007) evaluated the performance of different pan-sharpening techniques and proposed a simple approach to evaluate the image quality. They used several six pan-sharpening methods (PCA, BT, MT, MT*, GS and Zhang) and five common quality indices (CC, SAM, ERGAS, UIQI, and Q4). The results show an alternative approaches for image quality evaluation because it is provide a low computational complexity and easy to implement this solution for a real-time processing.

Ehlers (2008) applied pan-sharpening techniques for multi-temporal and/or multi-sensor image data. These techniques still create spatially enhanced datasets but usually at the expense of the spectral characteristics. According to his study, eight multi-temporal remote sensing images were fused with one panchromatic image to test eight different fusion techniques including MIHST, color normalization (CN), GS, BT, PCA, MT, EF, and WT. The fused images were visually and quantitatively analyzed for spectral characteristics preservation and spatial enhancement. He

confirmed only the newly developed EF guarantees excellent color preservation and spatial improvement for all dates and sensors. But the results from this research have been confirmed previous findings that the standard and even most of the advanced fusion methods that are implemented in commercial image processing systems cannot cope with the demands that are placed on them by multi-sensor/multi-temporal fusion. Nevertheless, PCA, CN or GS should only be used for single-sensor, single-date images. WT retains most of the spectral characteristics at the expense of spatial improvement.

Strait, Rahmani, and Markurjev (2008) examined seven pan-sharpening methods: IHST, IKONOS IHST, adaptive IHST, PCA, WT, P+XS, and variational wavelet pan-sharpening (VWP), and evaluated their effectiveness on IKONOS satellite imagery dataset. The evaluation relies on both visual inspection and metric performance data. The metric performance evaluation was used in the study included ERGAS, SAM, Spectral information divergence (SID), UIQI, RASE, RMSE, and CC. As a result, they concluded that the spectral quality is more difficult to judge visually. The IHST and PCA perform the best spatial enhancement but also produce the highest color distorted images and the VWP performs best spectrally. There is always a trade-off in spectral and spatial quality, because of this the choice of method can depend on the how the fused image will be used.

Klonus and Ehlers (2009) examined the effective approach for evaluation of the fusion techniques. The eleven different fusion methods were used in the study included WT, proportional AWL (AWLP), MT, BT, CN, IHST, EF, PCA, GS, HPF, and University of New Brunswick (UNB) fusion algorithm. The evaluation methods consisted of two approaches: visual comparison and statistical evaluation methods

(CC, Per-pixel Deviation (PD), RMSE, structure similarity index (SSIM), high pass correlation (HCC). They proved that not only the importance of evaluation methods that should be consistent, but also the necessity of a combined method for a quantitative assessment of spatial improvement and spectral preservation. Quantitative evaluation methods sometimes produce results that cannot be sustained by visual inspection. Furthermore, they concluded that visual analysis has to be a significant part of all quality evaluation procedures and different evaluation methods should be used to avoid that outliers could falsify the final results.

Helmy, Nasr, and El-Taweel (2010) had analyzed and evaluated the most commonly used data fusion techniques including MIHST, BT, PCA, MT, WT, HPF, and EF. The performance of each data fusion method was firstly qualitatively and quantitatively analyzed. The methods were then ranked according to the conclusions of the visual analysis and the results from quality budgets. Based on QuickBird image experiment, it was found that there is inconsistency between different performances measures used to evaluate data fusion techniques.

Intajag, Wettayaprasit, and Kodchabudthada (2010) evaluated different fusion techniques for pan-sharpened Thaichote images included IHST, Choi method, Tu method, and Pradhan algorithm. They concluded that IHST method, proposed by Choi and Tu, is simple to apply but the methods would cause severe spectral distortions. Furthermore, the wavelet-based method of Pradhan algorithm preserves the spectral characteristics and enhances the texture properties whereas increasing noise. If the decomposition level is too small then it may be disadvantageous for visual interpretation and classification.

Li and Li (2010) evaluated the effect of pan-sharpening method on image classification, they use Quickbird-2 with 8 pan-sharpening methods including BT, MIHST, PCA, HPF, smoothing filter-based intensity modulation (SFIM), wavelet transform with principal component analysis (W+PCA), EF, and region based image fusion (Region). ISODATA algorithm was also selected for classification. Overall accuracy and Kappa hat is used for measure the accuracy. The used image quality assessment were Cross Entropy (CE), Weighted Signal to Noise Ratio (WSNR), Reduced-Reference Image Quality Assessment (RRIQA), Quality Index based on Local Variance (QILV), and Objective Image Fusion Performance Measure (Q_{AB}^f) for evaluation. The result shows the best method is Region because it provides higher contrast, less color distortion, and highly scores of overall accuracy and Kappa while HPF method provided the worst result.

Ding and Wang (2011) tested four pan-sharpening methods including PCA, BT, IHST, and MT for medium and high resolution satellite imagery (SPOT 5 and QuickBird). An evaluation of the results was divided into two ways that are visual comparison and mathematical statistics analysis methods. According to the empirical study, PCA is more portrayed the image than BT method, and the image is clearer by PCA. BT is suitable for separating objects, especially the greenbelt. In conclusion, they stated that their research used only selected the average gray, standard deviation on fusion image evaluation but in the future, they may adopt more evaluation index for more comprehensively evaluation.

In summary, all literature reviews can be synthesized according to used data, pan-sharpening method, and image quality indicators and are compared to this research as shown in Table 2.6.

As results, it was found that during the last decade; most of the used data for pan-sharpening are very high spatial resolution from commercial satellite such as IKONOS and QuickBird with one case study of Thaichote data. At the same period, most of the selected pan-sharpening methods in all case studies relied on the availability of the existing function in the digital image processing software such as ERDAS Imagine, ENVI, PCI Geomatica and few modified existing algorithms. Meanwhile, all of the case studies used image quality indices (QI) as image quality criterion for pan-sharpening evaluation. Some researchers applied the additional image quality criteria such as visual image analysis (VIA), edge detection analysis (EDA), and effect on classification accuracy (ECA). Unfortunately, none of researchers combined all image quality criteria for pan-sharpening evaluation, especially optimum pan-sharpening method identification.

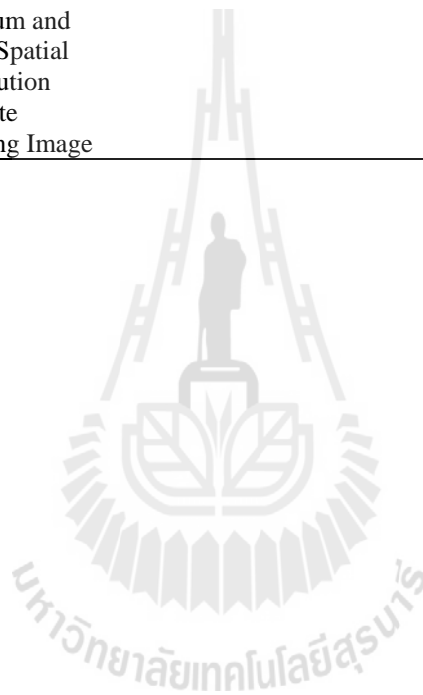
In this study, Thaichote data was used for pan-sharpening process with selected pan-sharpening methods, which was availability of the existing function under ERDAS Imagine and ENVI, and applied all image quality criteria for optimum pan-sharpening method identification by self-evaluation and based on users' requirement using SAW technique of MCDA.

Table 2.6 Synthesis of literature reviews.

Author(s)	Title	Used Data	Pan-sharpening method	Image quality indicator			
				VIA	EDA	QI	ECA
Parchaidis and Kazi-Tani (2000)	Landsat TM and ERS data fusion: A Statistical approach Evaluation for Four Different Methods.	Landsat TM and ERS-1	PCA, IHST, BT, MT	No	No	Yes	No
Du, Younan, King, and Shah (2007)	On the Performance Evaluation of Pan-Sharpener Techniques	IKONOS, Quickbird	PCA, BT, MT, MT*, GS, Zhang	No	No	Yes	No
Ehlers (2008)	Multi-image Fusion in Remote Sensing: Spatial Enhancement vs. Spectral Characteristics Preservation	SPOT 2, 4, 5 and Formosat 2	MIHST, CN, GS, BT, PCA, MT, EF, WT	Yes	No	Yes	No
Strait, Rahmani, and Markurjev (2008)	Evaluation of Pan-Sharpener Methods	IKONOS	IHST, IKONOS, IHST, Adaptive IHST, PCA, WT, P+XS, VWP	Yes	Yes	Yes	No
Klonus and Ehlers (2009)	Performance of evaluation methods in image fusion	Formosat, Spot 4, Spot 5, IKONOS, TerraSAR-X	WT, AWLP, MT, BT, CN, IHST, EF, PCA, GS, HPF, UNB	Yes	Yes	Yes	No
Helmy, Nasr, and El-Taweel (2010)	Assessment and Evaluation of Different Data Fusion Techniques	Quickbird	MIHST, BT, PCA, MT, WT, HPF, EF	No	No	Yes	No
Intajag, Wettayaprasit, and Kodchabudthada (2010)	Evaluation of Fusion Techniques for Pan-sharpened THEOS Imagery	Thaichote	IHST, Choi, Tu, Pradhan	No	Yes	Yes	No

Table 2.6 Synthesis of literature reviews (Continued).

Author(s)	Title	Used Data	Pan-sharpening method	Image quality indicator			
				VIA	EDA	QI	ECA
Li and Li (2010)	Effect of Image Fusion Algorithms on Classification Accuracy	Quickbird	BT, MIHST, PCA, HPF, SFIM, W+PCA, EF, Region	No	No	Yes	Yes
Ding and Wang (2011)	Analysis and Evaluation on Fusion Methods of Medium and High Spatial Resolution Remote Sensing Image	SPOT 5, Quickbird	PCA, BT, IHST, MT	No	No	Yes	No



CHAPTER III

MATERIALS AND METHODOLOGY

Summary of data, tools, and details of research methodology including (1) data preparation, (2) pan-sharpening process, (3) image quality evaluation, and (4) an optimum pan-sharpening method identification using SAW technique are here explained in this chapter.

3.1 Data

3.1.1 Thaichote satellite data

Thaichote data level 1A product, which does not apply any radiometric and geometric correction, is selected as input data in this work. In fact any radiometric correction directly influences to the quality of pan-sharpened image and its quality image evaluation while any geometric correction effects on the positional accuracy during geo-referencing process. The characteristics of Thaichote data level 1A is illustrated in Table 3.1.

In addition, two main conditions for selecting the testing image are the percent of cloud cover and viewing angle (along track and across track). This study sets the percent of cloud cover must less than 5% for visualization reason and the viewing angle of both along track and across track must not higher than ± 10 degree for a highly positional accuracy by orthorectification. Figure 3.1 shows the selected

testing Thaichote images and the specification of the testing image are shown in Table 3.2.

Table 3.1 Characteristics of Thaichote Level 1A.

Characteristic	Detail
Swath width (PAN)	12,000 pixels
PAN Coverage (At nadir)	22 x 22 km.
Swath width (MS)	6,000 pixels
MS Coverage (At nadir)	90 x 90 km.
Pointing accuracy	< 300 m. (RMS)
Dynamic range	8 bits among 12bits
Digital enhancement	Linear stretching (0-255)
Format	GeoTIFF
Receiving files	README.HTM, LOGO.JPG, <OE>.PDF, METADATA.DIM, IMAGERY.TIF, PROVIEW.JPG, ICON.JPG, STYLE.XSL

Source: GISTDA (2009).

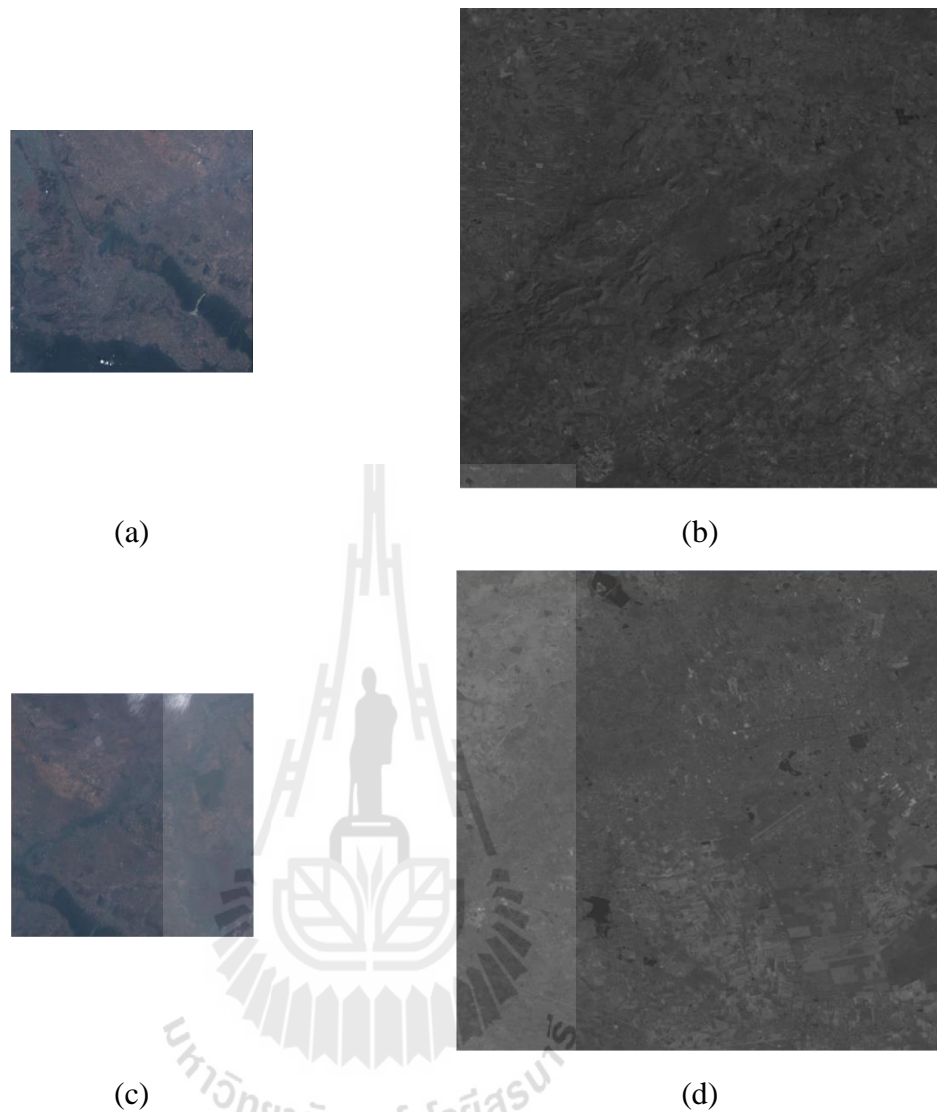


Figure 3.1 Original scaled Thaichote images in the study: (a) original MS scene1, (b) original PAN scene1, (c) original MS scene2, and (d) original PAN scene2.

Table 3.2 Characteristics of selected Thaichote images.

Characteristic	MS 1	PAN 1	MS 2	PAN 2
Acquired date	19/02/2010	19/02/2010	3/01/2010	3/01/2010
Along track (Degree)	7.756980	7.780434	-4.027254	-4.002944
Across track (Degree)	3.423262	3.432827	-0.250028	-0.241894
Satellite incidence angle (Degree)	9.577844	9.606438	4.562839	4.534815

Furthermore, ephemeris data of each Thaichote image scene which give the satellite's position in three-dimensional, geocentric coordinates at 15-second increments is extracted from METADATA.DIM file (Figure 3.2). This file is stored as XML format to encode ephemeris and auxiliary data of the satellite image. It allows users to access the information and broken down them in semantic blocks using parsing technique. This information is used in orthorectification process.

222	<Ephemeris>	13242	<Attitudes>
223	<SATELLITE_ALTITUDE> 8.2721005143970810e+05</SATELLITE_ALTITUDE>	13243	<Raw Attitudes>
224	<Raw Ephemeris>	13244	<UT1_UTC> 1.0000000149011612e-01</UT1_UTC>
225	<Point_List>	13245	<UTC_GPST>-1.5000000000000000e+01</UTC_GPST>
226	<Point>	13246	<U>7.272205E-7</U>
227	<TIME>2010-02-19 03:20:22.500000</TIME>	13247	<V>9.647792E-7</V>
228	<Location>	13248	<Quaternion_List>
229	<X>-1.5500150000000000e+06</X>	13249	<Quaternion>
230	<Y> 6.6096460000000000e+06</Y>	13250	<TIME>2010-02-19 03:20:22.500000</TIME>
231	<Z> 2.4074175000000000e+06</Z>	13251	<Q0> 2.5334727764129639e-01</Q0>
232	</Location>	13252	<Q1>-6.6145658493041992e-01</Q1>
233	<Velocity>	13253	<Q2> 4.4319802522659302e-01</Q2>
234	<X> 1.0830676269531250e+03</X>	13254	<Q3> 5.4942357540130615e-01</Q3>
235	<Y> 2.7847993164062500e+03</Y>	13255	</Quaternion>
236	<Z>-6.9188125000000000e+03</Z>	13256	<Quaternion>
237	</Velocity>	13257	<TIME>2010-02-19 03:20:22.750000</TIME>
238	</Point>	13258	<Q0> 2.5340378284454346e-01</Q0>
239	<Point>	13259	<Q1>-6.6139860130310058e-01</Q1>
240	<TIME>2010-02-19 03:20:22.750000</TIME>	13260	<Q2> 4.4316780567169189e-01</Q2>
241	<Location>	13261	<Q3> 5.4950666427612305e-01</Q3>
242	<X>-1.5497455000000000e+06</X>	13262	</Quaternion>
243	<Y> 6.6103430000000000e+06</Y>	13263	<Quaternion>
244	<Z> 2.4056875000000000e+06</Z>	13264	<TIME>2010-02-19 03:20:23.000000</TIME>
245	</Location>	13265	<Q0> 2.5345951318740845e-01</Q0>
246	<Velocity>	13266	<Q1>-6.6131532192230225e-01</Q1>
247	<X> 1.0835800781250000e+03</X>	13267	<Q2> 4.4313818216323853e-01</Q2>
248	<Y> 2.7830048828125000e+03</Y>	13268	<Q3> 5.4959011077880859e-01</Q3>
249	<Z>-6.9194560546875000e+03</Z>	13269	</Quaternion>
250	</Velocity>	13270	<Quaternion>
251	</Point>	13271	<TIME>2010-02-19 03:20:23.250000</TIME>
252	<Point>	13272	<Q0> 2.5351506471633911e-01</Q0>
253	<TIME>2010-02-19 03:20:23.000000</TIME>	13273	<Q1>-6.6124629974365234e-01</Q1>
254	<Location>	13274	<Q2> 4.4310826063156128e-01</Q2>
255	<X>-1.5494752500000000e+06</X>	13275	<Q3> 5.4967176914215088e-01</Q3>

Figure 3.2 Sample data of Thaichote satellite orientation.

3.1.2 Ground control point (GCP)

In orthorectification process, ground control point (GCP) is a point on the surface that known the location in specific reference system. Typically, GCP is used to geo-reference the image data, such as aerial photographs or satellite images. The coordinate of GCP can define as 2D (horizontal value) or 3D (horizontal and vertical value) which depends on the requirement of geo-referencing process. The spatial accuracy of GCP is very important because the positional error of GCP had

propagated to the result image. For this reason, the coordinate of GCPs should be carefully collected and the number of GCPs must be enough for the computation.

In this work, the horizontal coordinate of GCPs is measured from the color orthophoto of LDD while the vertical coordinate of GCPs is extracted from LDD's DEM dataset. Specification of color orthophoto and DEM dataset are shown in Table 3.3 and Table 3.4 and a sample of the both dataset are displayed in Figure 3.3.

Table 3.3 Specification of LDD color orthophoto and DEM datasets.

Specification	Detail
Ground Sampling Distance	0.5 m.
Coverage	2 x 2 km.
Coordinate Reference System	UTM
Datum	WGS84
Scale	1:4,000
Horizontal accuracy (Slope < 35%)	1 m. or better
Horizontal accuracy (Slope ≥ 35%)	2 m. or better

Table 3.4 Specification of LDD's DEM dataset.

Specification	Detail
Ground Sampling Distance	5 m.
Coverage	2 x 2 km.
Coordinate Reference System	UTM
Datum	WGS84
Scale	1:4,000
Horizontal accuracy	1 m. or better
Vertical accuracy	2 - 4 m. or better

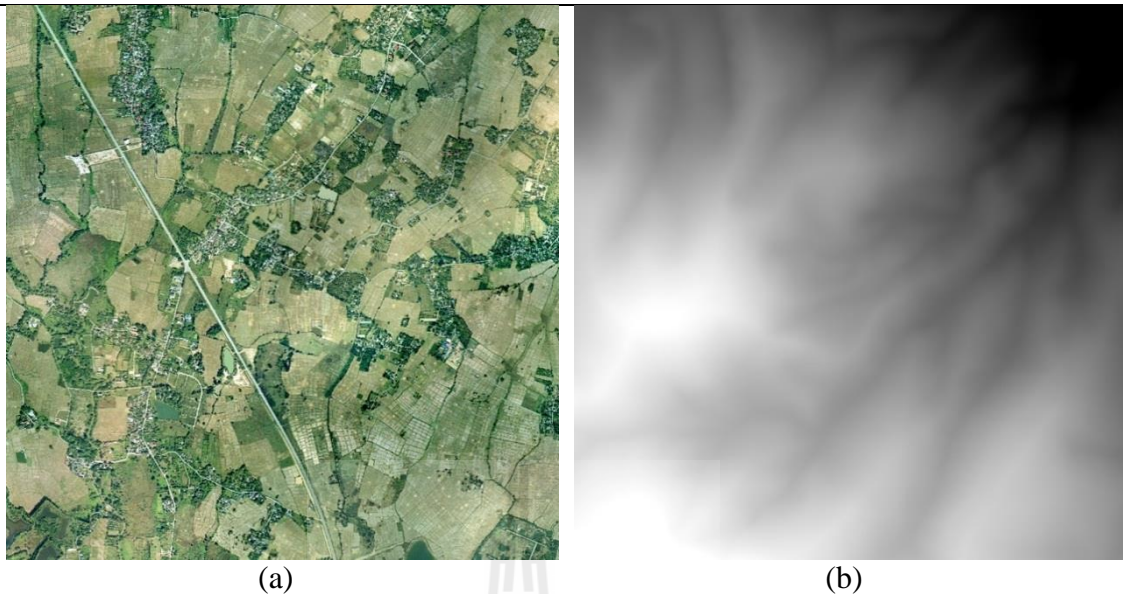


Figure 3.3 Two sample of LDD dataset: (a) color orthophoto and (b) DEM.

3.1.3 LDD datasets

Land use dataset in 2011 of Nakhon Ratchasima province and Digital Elevation Model (DEM) from LDD are here collected and used to identify the study areas and testing areas for the three main remote sensing applications. Moreover, the land use data is also used as secondary data for determining a number of classes for unsupervised classification (ISODATA) and as reference data for accuracy assessment of effect on classification accuracy while color orthophoto and DEM are also used in orthorectification process.

3.2 Tools

3.2.1 ENVI

ENVI is one of widely used digital image processing software in remote sensing application. Advantages of the software are providing a geospatial function to process and analyze a various type of remotely sensed images. It also supports a

various type of imagery format such as TIFF/GeoTIFF, HDF, ERDAS Imagine (.img), ECW, ER Mapper, or PCI (.pix). In this study, ENVI is also used to process a Gram-Schmidt pan-sharpening which only available in the software.

3.2.2 ERDAS imagine

This is proprietary digital image processing software that is popular in geospatial research and application. Main function is aimed to process a raster data and allows the user to work with Geographic Information System (GIS). This software is used to perform a different pan-sharpening method, sometime called “image fusion”, including BT, MT, PCA, IHST, MIHST, WT, HPF, and EF.

3.2.3 MATLAB

MATLAB which is a high-level language and high performance for numerical computation can analyze a various type of raster data. Basically, the digital number (DN) or pixel values of image are firstly converted into matrix format and stored as a matrix element. Then, it is possible to compute a various type of statistical value or create an image quality indicator with numerical method.

In this work, MATLAB is used to measure a spectral deviation using quality indices included CC, RMSE, RM, RASE, ERGAS, SAM, UIQI, and the performance of edge extraction in edge detection analysis (EDA). Their source codes are shown in Appendix A.

3.2.4 Questionnaire

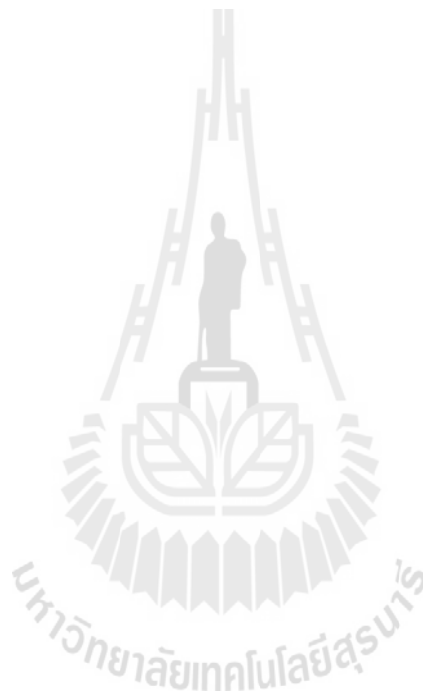
Questionnaire is used to extract the priority of image quality criteria for an optimum pan-sharpening method identification using MCDA. In general, the specific applications (agriculture, forestry, and urban) may need different characteristics of pan-sharpened image for its application. For example, the preservation of spectral value plays important role for land use type interpretation or extraction in agricultural and forestry application. So, experts who work with Thaichote image and use the pan-sharpened product are here selected as a correspondent and directly interviewed. Herewith experts from Land Development Department (LDD) and Office of Agricultural Economics (OAE) are identified and selected for agriculture application. Meanwhile correspondent for forestry application consists of experts from the Royal Forest Department (RFD) and Department of National parks, Wildlife and Plant Conservation (DNP), Geo-informatics and Space Technology Development Agency (GISTDA), and lecturers from the universities. At the same time, experts from Department of Public Works and Town & Country Planning (DPT) are identified and selected for urban application.

Details of questionnaire for agriculture, forestry, and urban applications are presented Appendix B. The major contents of questionnaires covered the following topics:

- (1) Objective of questionnaire
- (2) Basic information of pan-sharpening method and image quality evaluation
- (3) Basic information of correspondent
- (4) User requirement assessment

3.3 Research methodology

This research comprised of 4 components, including (1) data preparation and orthorectification, (2) pan-sharpening processing, (3) image quality evaluation, and (4) optimum pan-sharpening method identification. The main components of the research workflow are schematically presented in Figure 3.4 and its detail is further explained in the following sections.



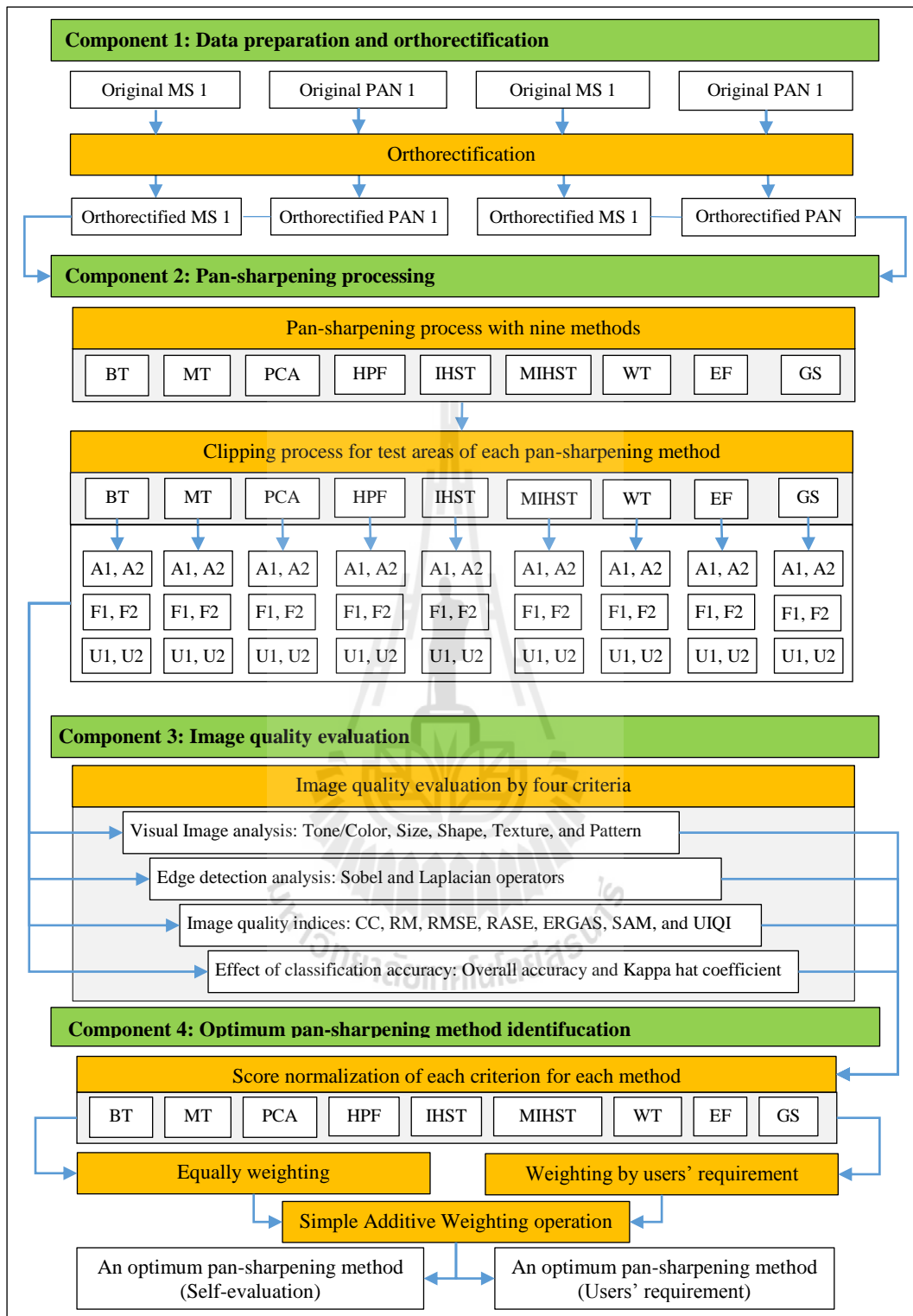


Figure 3.4 Schematic workflow of research methodology.

3.3.1 Data collection and orthorectification

The Thaichote images at Level 1A are firstly collected and orthorectified for generating the orthophoto imageries with highly accurate position and uniformly scale. In practice, virtual GCPs are derived from LDD's color orthophoto product. This process is accomplished using Leica Photogrammetry Suite which is embedded in ERDAS Imagine software. The schematic workflow of image orthorectification process is illustrated in Figure 3.5. Summary of each step is explained in following sections.

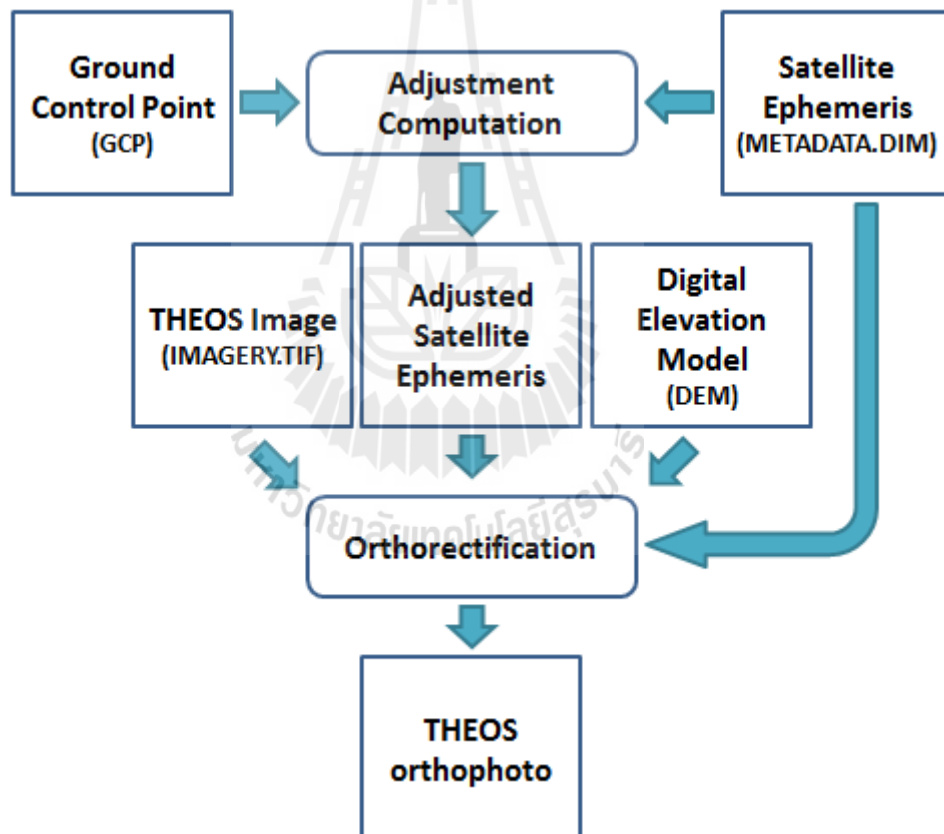


Figure 3.5 Thaichote orthorectification workflow.

3.3.1.1 DEM correction

LDD's DEM is firstly converted into ASCII format under ERDAS Imagine software and they then check and correct for the abnormal values or missing value and it is converted to raster file orderly. After that all sheets of corrected DEM are mosaicked for using in orthorectification process.

3.3.1.2 GCP collection and measurement

3D GCPs (X, Y, and Z) in UTM coordinate reference system are measured to perform an orthorectification. The horizontal coordinates are measured from the color orthophoto of LDD and the vertical coordinate are extracted from the corrected LDD's DEM dataset while image coordinate of GCPs is also measured for supporting computation in the orthorectification process. In this study, a minimum of seven GCPs per scene of Thaichote image as recommended by Santitamnont and Lerk-u-suke (2009) are at least collected and use in orthorectification.

GCP measurement is performed with LPS module in ERDAS Imagine software. Image and ground coordinates must have the total RMSE of triangulation less than one-third pixel (0.3333 pixels) for accuracy and reliability reasons. Figure 3.6 shows a measurement of image and ground coordinates of GCPs.

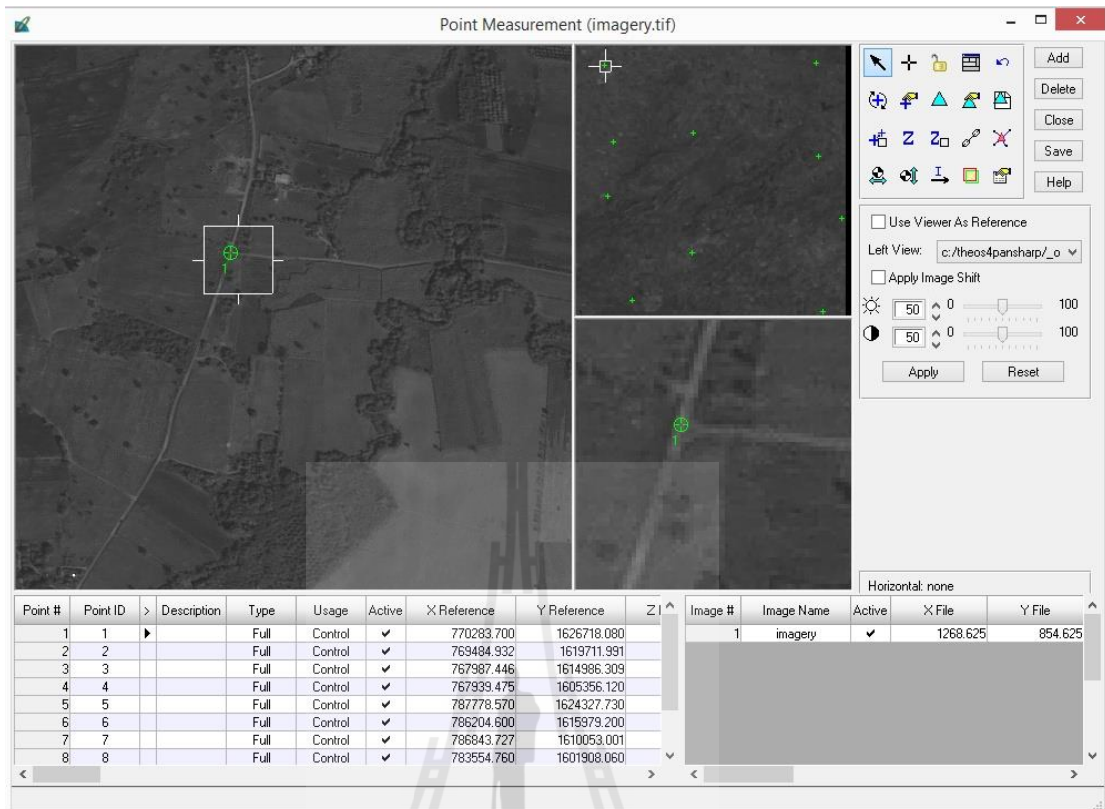


Figure 3.6 Measurement of image and ground coordinates of GCPs.

3.3.1.3 Thaichote orthorectification

Thaichote orthorectification process uses the raw digital imagery (with ephemeris data), GCPs (with ground and image coordinate values), and DEM for generating a Thaichote orthorectified image. In practice, general user can process an orthorectified image by using Thaichote 1A product directly. However, the geometrical errors during image capturing and the topographic errors still remain in an orthorectified image. Therefore, GCPs and DEM is needed to eliminate those errors,

An adjustment of original ephemeris data need to use a collection of GCPs to compute a higher quality to produce a high positional accuracy of an

orthorectified image. Moreover, DEM is also used to eliminate topographic errors in orthorectification process. Nearest neighbor interpolation is selected for determining a new brightness value. Finally, four Thaichote images (2 MS and 2 PAN images) are processed separately.

3.3.2 Pan-sharpening process

After completion of image orthorectification process, the results are then used to merge a PAN image and MS image into a single file using different pan-sharpening methods. In the study, 9 different methods used under the pan-sharpening process component included:

- (1) Brovey transformation (BT),
- (2) Multiplicative transformation (MT),
- (3) Principal Component Analysis (PCA),
- (4) Intensity-Hue-Saturation transformation (IHST),
- (5) Modified Intensity-Hue-Saturation transformation (MIHST),
- (6) Wavelet transformation (WT),
- (7) High Pass Filtering (HPF),
- (8) Ehlers fusion (EF), and
- (9) Gram-Schmidt pan-sharpening (GS).

In addition, the nearest neighbor resampling technique is here applied as standard technique for pan-sharpening methods (if it required the resampling). The pan-sharpening process workflow is depicted in Figure 3.7. Most of pan-sharpening methods are processed with ERDAS Imagine software except Gram-Schmidt pan-sharpening (GS) is processed using ENVI software.

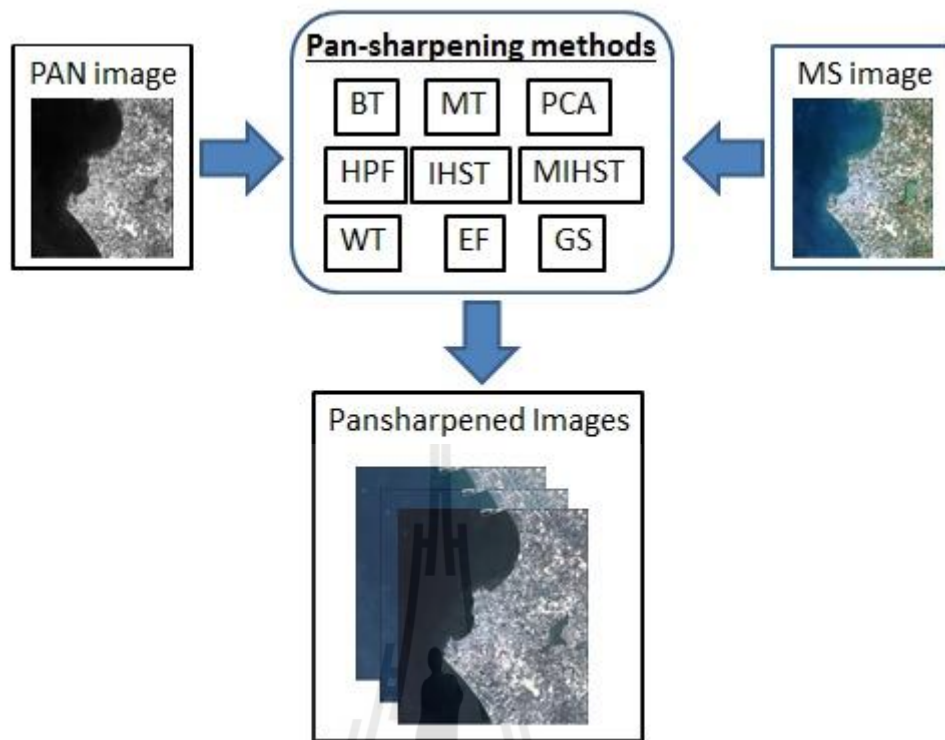


Figure 3.7 The pan-sharpening processing workflow.

In addition, the effect of resampling techniques on pan-sharpening process that influences the spectral information preservation is also investigated in this study. Herein all standard resampling methods including nearest neighbor, bilinear interpolation and cubic convolution are applied to the selected pan-sharpening algorithms except EF and WT. The effect of resampling method in each pan-sharpening algorithm is examined using UIQI for the spectral deviation measurement. Herewith, standard resampling technique which provides the lowest spectral deviation between MS image and pan-sharpened images is chosen as an optimum resampling technique. An additional testing area for studying the effect of resampling technique on pan-sharpening process which covers three main land use types (urban and built-up area, agricultural and forest lands), is selected as shown in Figure 3.8. The derived

results can be used as a guideline for Thaichote pan-sharpening implementation in the future.



Figure 3.8 Testing image for evaluation the effect of resampling method on image pan-sharpening.

3.3.3 Image quality evaluation

Image quality evaluation aims to assess an image which produces from the different pan-sharpening methods. The main important characteristics of those processes are the spectral information preservation and the spatial enhancement. A variety of image quality evaluation are reviewed from relevant papers such as: Ehlers (2008), Hely, Nasr, and Taweel (2010), Klonus and Ehlers (2009), Li and Li (2010), Du, Younan, King, and Shah (2007), and Vijayaraj (2004). In the study, image quality is evaluated based on four criteria included:

3.3.3.1 Visual image analysis (VIA)

Tone/color change and the texture, which are the main element of image interpretation, were used to compare between original multispectral image and pan-sharpened image. This criterion which applied for visual image interpretation had been used by various researchers such as Ehlers (2008), Strait et al. (2008), and Klonus and Ehlers (2009).

In this study, elements of image interpretation include tone, color, size, shape, texture, and pattern are applied to evaluate image quality based on visual image analysis. Herewith, tone and color are used to compare the spectral deviation between MS image and pan-sharpened images. Meanwhile size, shape, texture, and pattern are used to measure their difference between PAN image and pan-sharpened images. In practice, each element of image interpretation is separately quantified in term of its properties preservation at three levels (with score): good (3), moderate (2) and poor (1) for indicating the image quality for visual interpretation. The original total score is then used to simply classify the visual interpretability's level: low (6-10), moderate (11-14), and high (15-18) using equal interval method. These results are then used to indicate image quality of pan-sharpening methods based on visual image analysis criteria. In addition, the derived original total score of each pan-sharpening method is further normalized by dividing of maximum score for comparing with the other criteria.

3.3.3.2 Edge detection analysis (EDA)

Edge detection analysis of image enhancement includes Sobel and Laplacian operators are firstly used to generate edge detected image from the original

PAN and pan-sharpened images. After that both images are used to calculate correlation coefficient (CC), which has a dynamic range between 0 and 1, to indicating the performance of pan-sharpening methods. This measurement is a widely used for pan-sharpening evaluation with edge detection analysis such as Strait et al. (2008), Klonus and Ehlers (2009), and Intajag et al. (2010).

Furthermore, the average CC value from all band in each pan-sharpening method from two operators are calculated, and then normalized into the comparable score (0 to 10) for comparing with the other criteria.

3.3.3.3 Quality indices (QI)

The standard quality indices include RMSE, CC, RM, RASE, ERGAS, SAM, and UIQI are here applied to measure the pan-sharpened image quality. The quality indices as image quality indicators are the most frequently used by researchers for pan-sharpening evaluation. In this study, MATLAB is used to calculate quality index values.

In addition, the derived quality indices from each pan-sharpening method except CC and UIQI are normalized (0-10) by Min-Max stretching method as total score and its total score is normalized again by dividing of 7 at the normalize scale of 1-10 for comparing with the other criteria.

3.3.3.4 Effect on classification accuracy (ECA)

This is an alternative solution for measuring the changing of image quality when the pan-sharpening is used to extract land use and land cover. ISODATA clustering algorithm is here applied to the pan-sharpened images for land

cover classification according to modification of land use classification of LDD. All derived thematic data are then assessed the classification accuracy using overall accuracy and Kappa hat coefficient of agreement based on land use data of LDD in 2011 and field survey in 2013. This measurement had applied by Li and Li (2010) for pan-sharpening evaluation in term effect on classification accuracy.

In addition, the derived values according accuracy assessment are combined and normalized (0-10) by dividing of 20 for comparing with the other criteria.

3.3.4 Optimum pan-sharpening method identification

Under this component, the quantitative image quality of pan-sharpened data by four criteria including (1) visual image analysis, (2) edge detection evaluation (3) spectral quality indices, and (4) effect on classification accuracy from the previous component are combined using SAW method (eq. 2.25) for an optimum pan-sharpening method identification. In this study two options is implemented include an optimum pan-sharpening method identification by self-evaluation and users' requirement.

3.3.4.1 Optimum pan-sharpening method identification by self-evaluation

The normalized values of image quality criteria (VIA, EDA, QI, and ECA) are here firstly combined using SAW method with equal weight to identify an optimum pan-sharpening method by self-evaluation for each application (agriculture, forestry, and urban). Then the derived total scores are ranked to identify an optimum pan-sharpening method by self-evaluation.

3.3.4.2 Optimum pan-sharpening method identification based on users' requirement

Similar to an optimum pan-sharpening method identification by self-evaluation, the normalized values of image quality criteria (VIA, EDA, QI, and ECA) are here firstly combined using SAW method with the derived weight based on specific users' requirement of three expert groups (agriculture, forestry, and urban application) to identify an optimum pan-sharpening method by users' requirement. Herein, the questionnaires, which are prepared in advance for each application and used to directly interview with experts as mentioned in Section 3.2.4, are compiled to determine weight for each criteria of each application. Finally, the derived total scores are ranked to identify an optimum pan-sharpening method based on users' requirement. The workflow for optimum pan-sharpening method identification is shown in Figure 3.9.

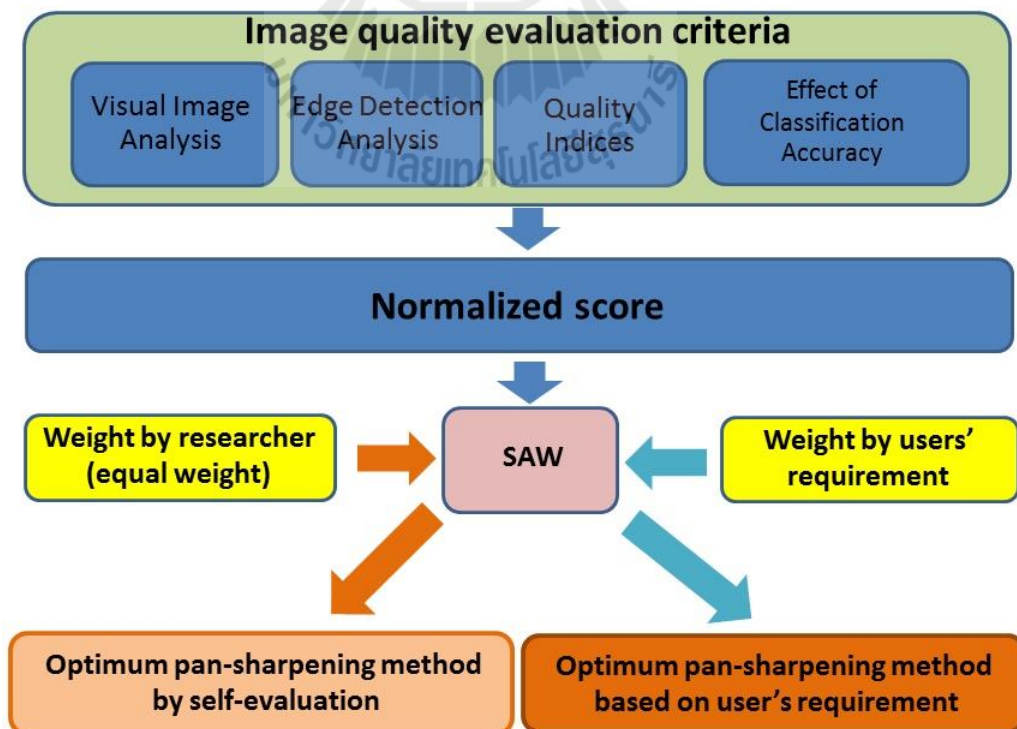


Figure 3.9 An optimum pan-sharpening method identification workflow.

CHAPTER IV

RESULTS AND DISCUSSIONS

The main results for development of analysis and evaluation techniques for Thaichote image pan-sharpening had been separately explained by each specific objective and significant finding.

4.1 Data preparation and orthorectification

As mentioned in Chapter III, the datasets had been used in this study consisting of (1) Thaichote satellite imageries: 2 multispectral images and 2 panchromatic images, (2) LDD's color orthophoto and digital elevation model (DEM), and (3) land use map in 2011 of LDD. Original Thaichote images are illustrated in Figure 4.1 and their viewing information was summarized in Table 4.1.

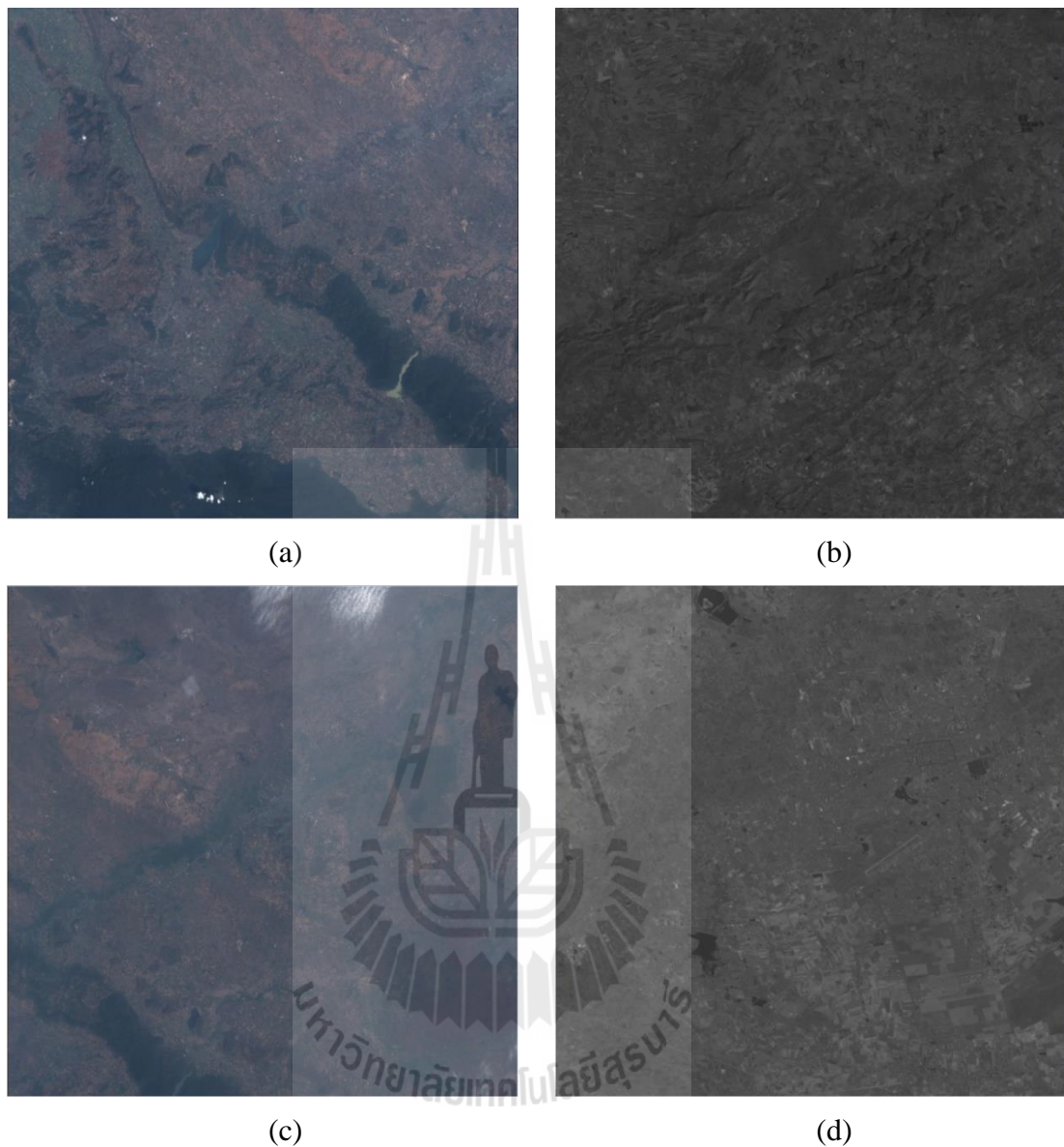


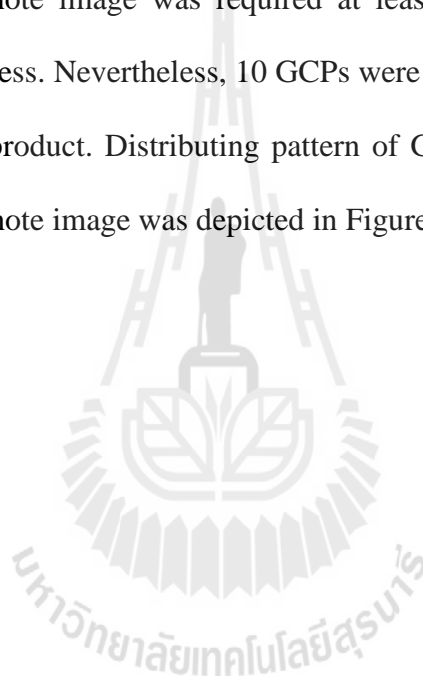
Figure 4.1 Original Thaichote images: (a) MS1, (b) PAN1, (c) MS2, and (d) PAN2.

Table 4.1 Viewing information of Thaichote images.

Image	Date	Pixel	Viewing angle	
			At along track (Degree)	At across track (Degree)
MS 1	2010/01/03	6,000	7.756980	3.423262
PAN 1	2010/01/03	12,000	7.780434	3.432827
MS 2	2010/02/19	6,000	-4.027254	-0.250028
PAN 2	2010/02/19	12,000	-4.002944	-0.241894

4.1.1 Thaichote orthorectification

The orthorectification process was used to eliminate scale, tilt, and relief distortions of Thaichote images. Theoretically, the result of orthorectification, called orthorectified image, is free of relief displacements and the scale variations (Wolf and Dewitt, 2000). In this study, color orthophoto map of LDD herein was used to collect the horizontal coordinate and LDD's DEM was used to collect the vertical coordinate of GCP. Each Thaichote image was required at least 7 GCPs for performing the orthorectification process. Nevertheless, 10 GCPs were actually used to create a better orthorectified image product. Distributing pattern of GCPs for the orthorectification process of each Thaichote image was depicted in Figure 4.2.



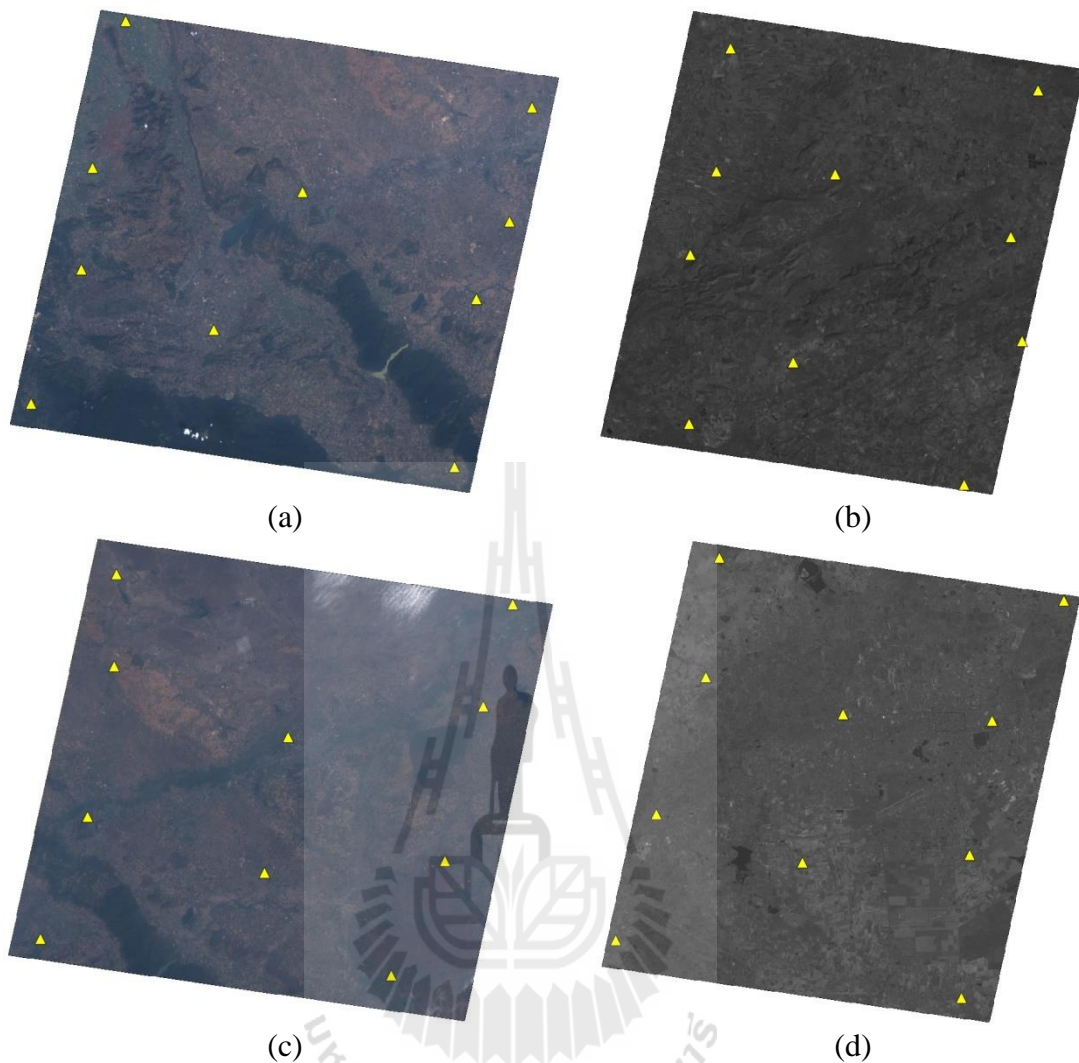


Figure 4.2 GCPs distribution for orthorectification process of each Thaichote image: (a) MS1, (b) PAN1, (c) MS2 and (d) PAN2.

When GCP coordinates and Thaichote image coordinate were measured and collected for modeling the various types of distortion, the photogrammetric triangulation residuals were then computed to each image. The positional accuracy of orthorectified image was justified based on the total RMSE in the triangulation report. In this study, the acceptable value of total RMSE in triangulation is less than one-third pixel (~ 0.3333). The total RMSE of triangulation for Thaichote orthorectification of MS 1, PAN 1, MS 2, and PAN 2 was 0.0294, 0.2327, 0.0408 and 0.2351 pixel. In

addition, the list of RMSE for control points (ground and image) used for triangulation was summarized in Table 4.2. Details of RMSE of each ground and image control points with residual values were presented in Appendix C. The Thaichote orthorectified images were illustrated in Figure 4.3.

Table 4.2 Lists of RMSE for ground and image control points under orthorectification process.

RMSE (in pixel) of	Thaichote Image			
	MS 1	PAN 1	MS 2	PAN 2
Ground control point in X direction	0.0254	0.2579	0.0294	0.2768
Ground control point in Y direction	0.0261	0.2653	0.0271	0.2501
Ground control point in Z direction	0.0113	0.0922	0.0179	0.1579
Image control point in X direction	0.1937	0.2848	0.2185	0.3520
Image control point in Y direction	0.2303	0.3575	0.2503	0.3363

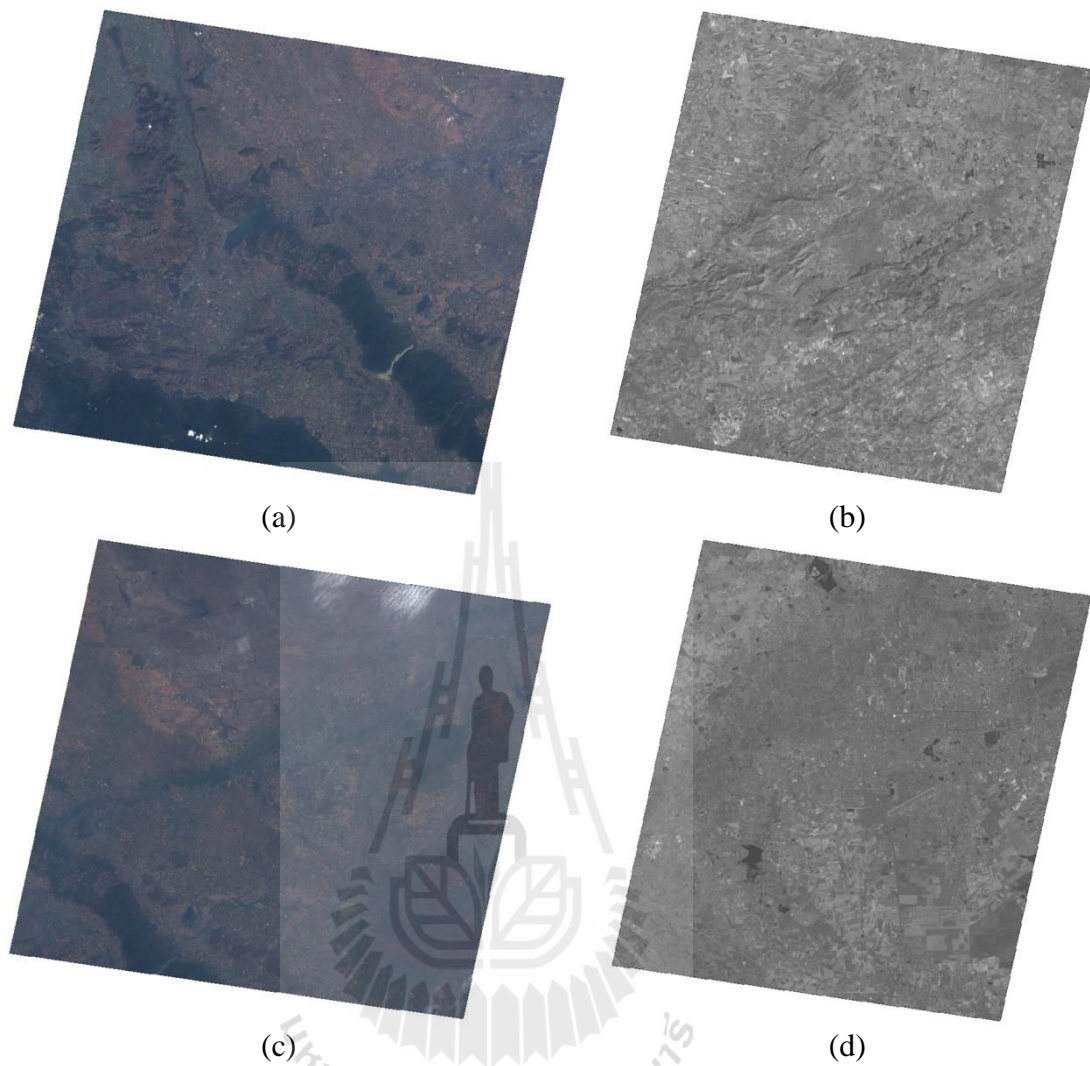


Figure 4.3 Thaichote orthorectified images: (a) MS1, (b) PAN1, (c) MS2, and (d) PAN2.

4.2 Pan-sharpening process

Orthorectified MS and PAN images were used to produce the pan-sharpened images using nine different image pan-sharpening methods included Brovey transformation (BT), Multiplicative Transformation (MT), IHS transformation (IHST), Modified IHS transformation (MIHST), Principal Component Analysis (PCA), Wavelet fusion method (WT), High Pass Filtering (HPF), Ehlers fusion (EF),

and Gram-Schmidt pan-sharpening (GS). All pan-sharpened images were clipped by the boundary of selected study areas to create testing images for specific remote sensing application (agriculture, forestry, and urban) later on. All testing images of three applications were displayed as true color composite according to pan-sharpening method as shown in Figure 4.4 - 4.12.

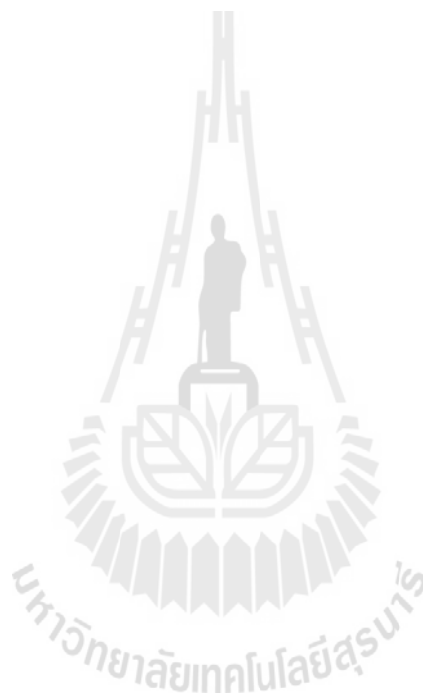




Figure 4.4 Testing images produced from BT method: (a) A1, (b) A2, (c) F1, (d) F2, (e) U1, and (f) U2.

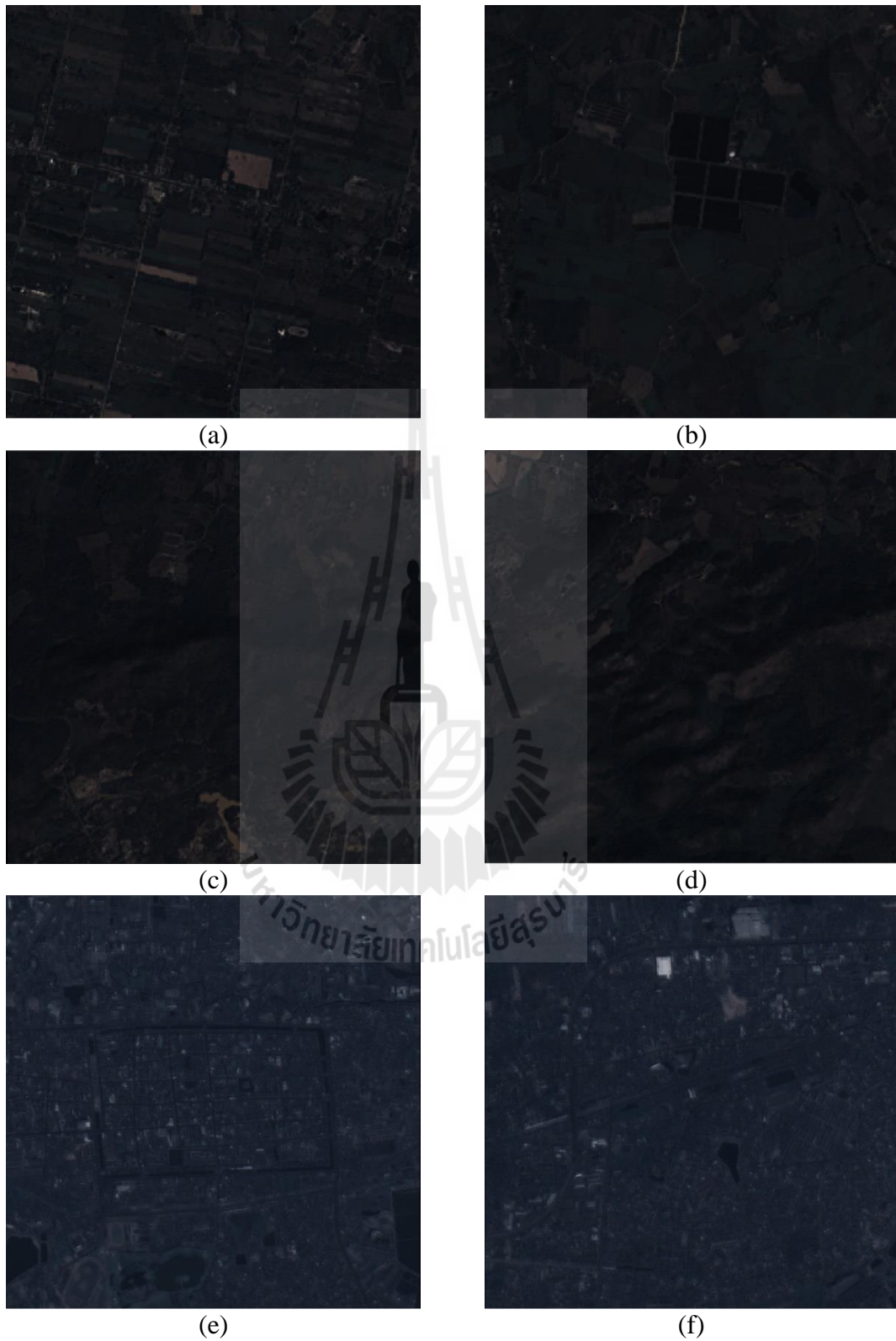


Figure 4.5 Testing images produced from MT method: (a) A1, (b) A2, (c) F1, (d) F2, (e) U1, and (f) U2.



Figure 4.6 Testing images produced from PCA method: (a) A1, (b) A2, (c) F1, (d) F2, (e) U1, and (f) U2.

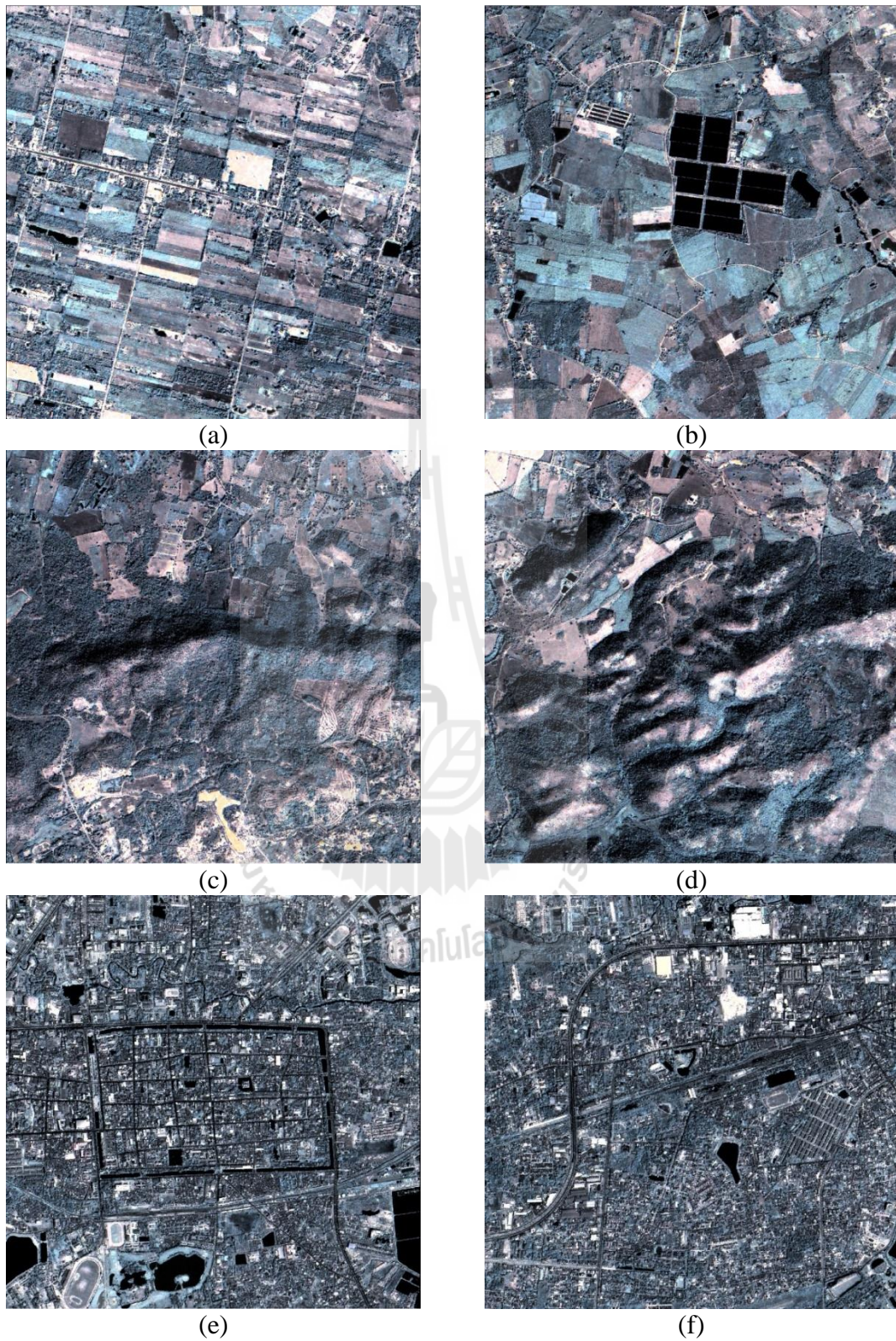


Figure 4.7 Testing images produced from IHST method: (a) A1, (b) A2, (c) F1, (d) F2, (e) U1, and (f) U2.



Figure 4.8 Testing images produced from MIHST method: (a) A1, (b) A2, (c) F1, (d) F2, (e) U1, and (f) U2.



Figure 4.9 Testing images produced from HPF method: (a) A1, (b) A2, (c) F1, (d) F2, (e) U1, and (f) U2.

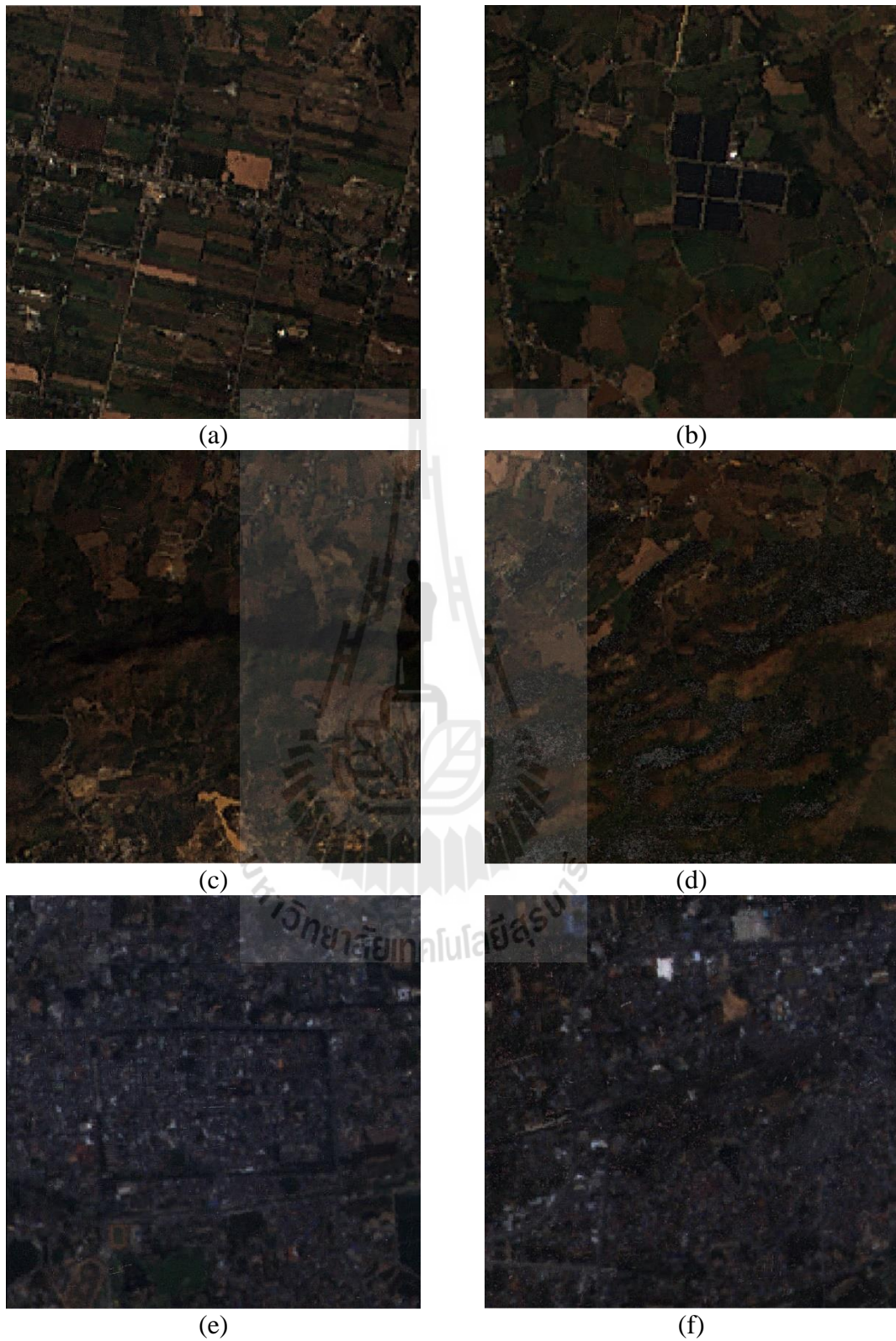


Figure 4.10 Testing images produced from WT method: (a) A1, (b) A2, (c) F1, (d) F2, (e) U1, and (f) U2.

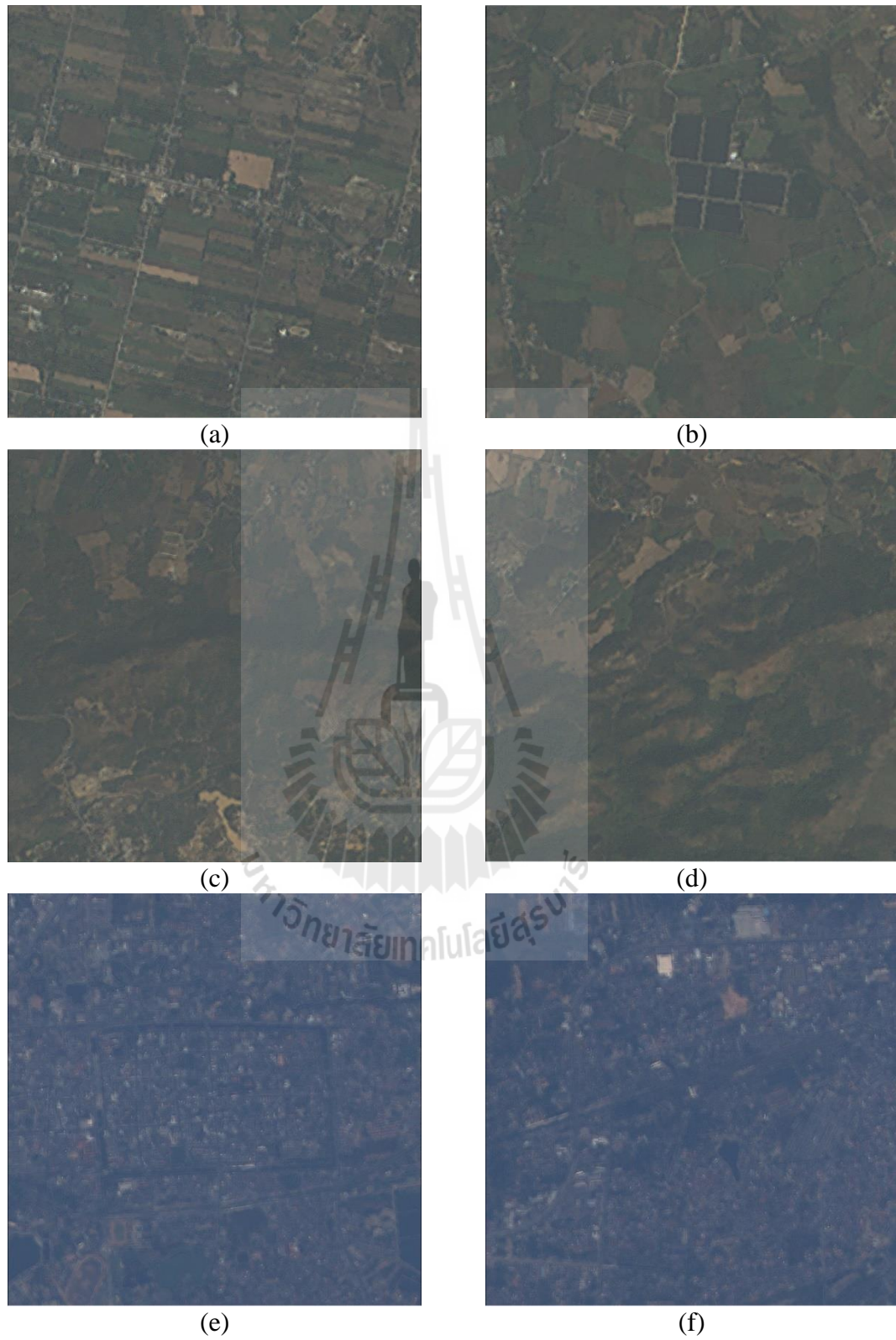


Figure 4.11 Testing images produced from EF method: (a) A1, (b) A2, (c) F1, (d) F2, (e) U1, and (f) U2.

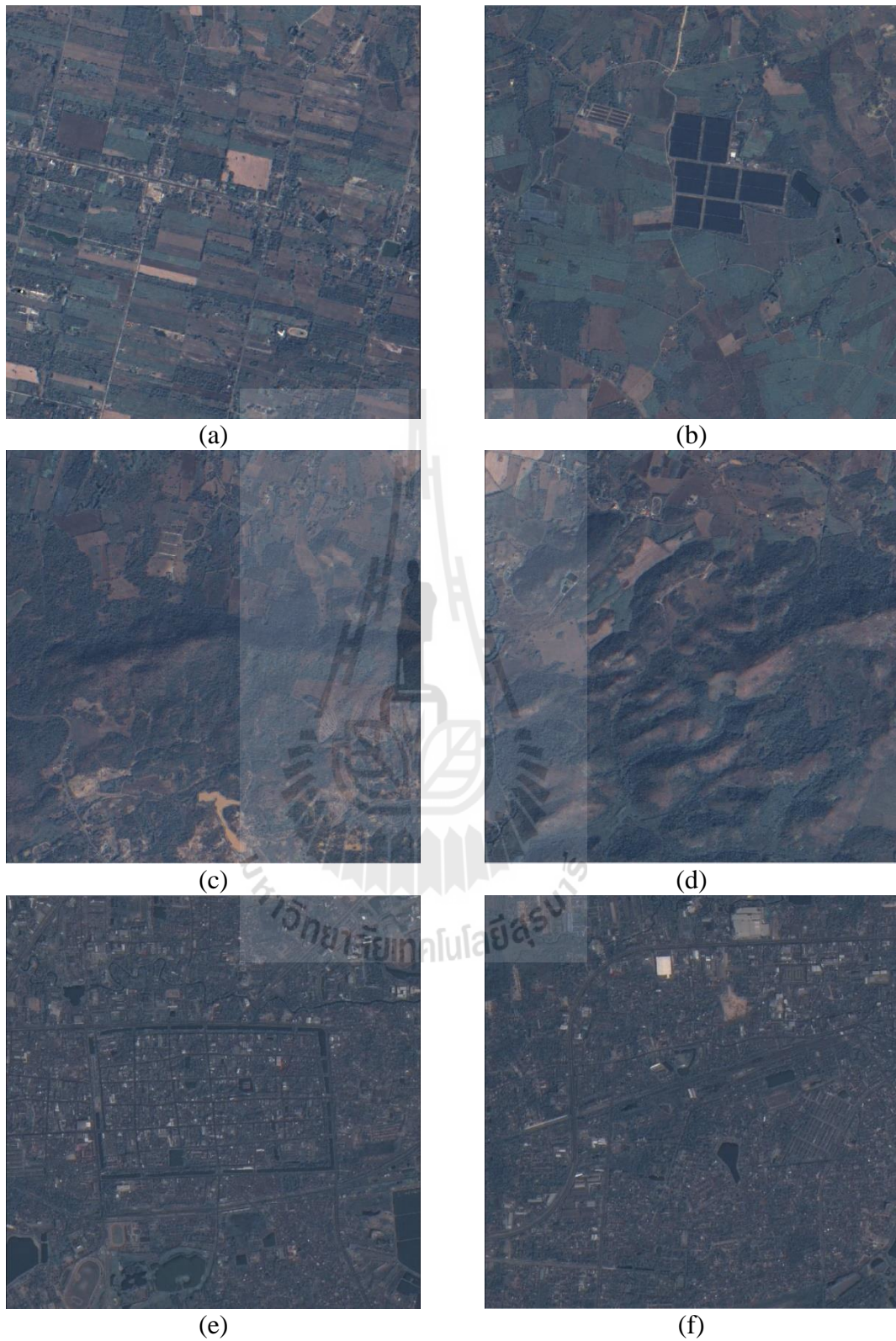


Figure 4.12 Testing images produced from GS method: (a) A1, (b) A2, (c) F1, (d) F2, (e) U1, and (f) U2.

According to the results shown in Figures 4.4 - 4.12, variety image qualities including tone, color, size, shape, texture, and pattern can be visually identified on testing image according pan-sharpening methods. Figures 4.4, 4.5, and 4.10 which displayed six pan-sharpened images processed from BT, MT, and WT methods provided a low brightness and contrast to resulting images in all testing areas (agriculture, forestry, and urban applications). On the contrary, six pan-sharpened images in Figure 4.7 which was produced by IHST method showed very high brightness and contrast for all testing areas. Because the derived pan-sharpened image of IHST method was automatically applied Minimum-Maximum contrast stretching under ERDAS Imagine software. Meanwhile, the others pan-sharpened images from others pan-sharpening methods including PCA, MIHST, HPF, EF, and GS as shown in Figures 4.6, 4.8, 4.9, 4.11, and 4.12 showed moderate brightness and contrast. As a result, it is concluded that the differentiation of image quality by visual comparison is rather difficult as it is a subjective judgment and relies on background, experience, and skills of evaluator or interpreter.

However, basic image statistics including minimum, maximum, range, mode, median, mean, and standard deviation (std.) of three visible bands (red, green, and blue) of all pan-sharpening methods provided more valuable information to compare and quantify the characteristics of image quality. Tables 4.3 - 4.8 showed the basic statistics of all pan-sharpened images in 6 testing areas (A1, A2, F1, F2, U1, and U2).

According to basic statistic information, brightness values within ± 1 standard deviation (SD) of the mean from BT, MT, and WT methods were very low with low contrast for all testing areas. For example, in testing area 1 for agriculture application (A1), the minimum and maximum brightness values within ± 1 SD of the mean from

MT method for red, green and blue band narrowly varied between 30.3302-52.3586, 38.0910-55.3156, and 42.0501-56.7713 (see Table 4.3).

In contrast, ± 1 SD of the mean brightness value from IHST method was very high with high contrast for all testing areas. For instance, the minimum and maximum brightness values within ± 1 SD of the mean for red, green and blue bands widely varied between 62.0802-194.3038, 71.0067-201.7955, and 84.3398-220.3756 in A1 area (see Table 4.3). At the same time, ± 1 SD of the mean brightness value for all bands from others methods (PCA, MIHST, HPF, EF, and GS) was moderate with moderate contrast for every testing area. For example, the minimum and maximum brightness values within ± 1 SD of the mean from GS method for red, green and blue bands were varies between 59.6934-103.3838, 73.2458-107.2732, and 90.6189-121.2501 in A1 (see Table 4.3).

Moreover, ± 1 SD of the mean brightness value of each band from each method in all testing areas can be displayed as stock chart in Figures 4.13 - 4.18. All charts can be easily identified a group of image contrast into three groups: low, moderate and high, based on the brightness value and its range in each band. It was found that MT and WT methods in all testing areas provided a low brightness and contrast image with brightness value less than 50 and narrow range. Similarly, BT method also provided a low brightness and contrast image in agriculture and forestry testing areas. In contrast, IHST method had a very high brightness and contrast image with brightness value higher than 100 and wide range in all testing areas. Meanwhile, other methods (PCA, MIHST, HPF, EF, and GS) provided a pan-sharpened image with moderate brightness and contrast with brightness value between 50 and 100

Table 4.3 Basic statistic values from 9 pan-sharpening methods for agriculture testing area 1 (A1).

Method	Band	Min	Max	Range	Mode	Median	Mean	Std.
BT	Red	1	234	233	39	40	41.3444	11.0142
	Green	1	231	230	46	46	46.7033	8.6123
	Blue	1	209	208	50	49	49.4107	7.3606
MT	Red	0	234	234	18	18	19.7221	8.3359
	Green	0	202	202	21	21	21.7006	6.7995
	Blue	0	194	194	25	25	25.3888	6.1902
PCA	Red	45	245	200	92	91	91.5455	8.6778
	Green	23	240	217	73	73	73.0744	8.9528
	Blue	41	220	179	76	76	76.8925	6.9013
IHST	Red	0	255	255	255	127	128.1920	66.1118
	Green	0	255	255	255	138	136.4011	65.3944
	Blue	0	255	255	255	162	152.3577	68.0179
MIHST	Red	30	255	225	70	74	77.2175	19.5159
	Green	0	255	255	85	85	86.0381	14.6191
	Blue	0	255	255	101	101	101.4982	13.2262
HPF	Red	0	255	255	76	76	76.8223	23.5845
	Green	23	255	232	85	85	85.3686	14.7669
	Blue	58	255	197	100	100	100.6967	9.5170
WT	Red	0	255	255	33	33	37.7147	25.607
	Green	0	255	255	29	32	32.2189	17.8119
	Blue	0	255	255	24	23	24.6422	12.9674
EF	Red	46	237	191	86	89	90.8771	13.0787
	Green	56	237	181	95	94	95.1958	10.1653
	Blue	51	228	177	90	91	91.2961	9.1663
GS	Red	0	255	255	78	80	81.5386	21.8452
	Green	0	255	255	89	90	90.2595	17.0137
	Blue	0	255	255	107	106	105.9345	15.3156

Table 4.4 Basic statistic values from 9 pan-sharpening methods for agriculture testing area 2 (A2).

Method	Band	Min	Max	Range	Mode	Median	Mean	Std.
BT	Red	13	230	217	36	37	37.3090	7.8198
	Green	19	213	194	45	44	43.8684	6.5308
	Blue	17	218	201	47	47	46.5330	5.7061
MT	Red	5	227	222	17	16	16.8907	5.2174
	Green	7	225	218	19	19	19.4511	4.5482
	Blue	9	225	216	23	23	22.8921	4.2621
PCA	Red	45	245	200	90	89	88.7818	6.7588
	Green	33	226	193	70	71	70.6746	7.4366
	Blue	34	239	205	73	73	73.2247	4.8884
IHST	Red	0	255	255	0	107	105.9715	56.3790
	Green	0	255	255	0	120	117.4977	60.0255
	Blue	0	255	255	0	137	131.6063	65.0413
MIHST	Red	34	255	221	68	69	70.1620	13.9470
	Green	0	255	255	83	81	81.3284	11.0239
	Blue	0	254	254	96	96	96.2146	10.0717
HPF	Red	0	255	255	70	71	72.0275	17.0547
	Green	24	255	231	83	82	82.5369	10.4407
	Blue	54	255	201	97	97	97.6504	6.5541
WT	Red	0	255	255	27	27	30.6477	18.8842
	Green	0	255	255	26	26	27.8282	12.5633
	Blue	0	255	255	18	18	19.4512	8.7235
EF	Red	55	251	196	84	85	86.8818	9.5023
	Green	64	241	177	91	92	92.5896	7.1513
	Blue	51	235	184	87	88	88.1809	6.4483
GS	Red	0	255	255	73	73	73.4640	15.9890
	Green	0	255	255	86	85	84.6821	12.8198
	Blue	0	255	255	100	100	99.9637	11.1856

Table 4.5 Basic statistic values from 9 pan-sharpening methods for forestry testing area F1 (F1).

Method	Band	Min	Max	Range	Mode	Median	Mean	Std.
BT	Red	11	131	120	34	36	37.2472	9.8802
	Green	20	140	120	42	42	42.4942	7.2626
	Blue	23	146	123	46	46	46.2346	6.2009
MT	Red	5	77	72	13	15	16.3902	6.5819
	Green	7	74	67	17	17	18.2060	5.1063
	Blue	10	84	74	22	21	21.9127	4.5859
PCA	Red	58	184	126	88	89	89.0830	7.6079
	Green	41	161	120	67	68	67.9572	7.2540
	Blue	46	145	99	71	71	71.4958	5.1057
IHST	Red	0	255	255	0	89	97.5151	63.8906
	Green	0	255	255	0	99	102.9934	61.1757
	Blue	0	255	255	129	113	117.9988	65.6015
MIHST	Red	28	236	208	62	67	70.2864	17.3253
	Green	45	237	192	77	78	79.1306	11.8391
	Blue	47	239	192	95	95	96.0569	10.6944
HPF	Red	0	255	255	69	70	71.0827	20.6800
	Green	33	255	222	78	79	79.6318	12.4695
	Blue	65	213	148	95	96	96.0163	7.6032
WT	Red	0	255	255	0	27	29.5836	23.3887
	Green	0	234	234	20	22	23.2876	15.4068
	Blue	0	213	213	14	15	16.4248	10.1201
EF	Red	53	190	137	78	84	86.2480	11.7161
	Green	62	190	128	87	89	90.0917	8.3859
	Blue	58	192	134	85	86	86.8299	7.2667
GS	Red	0	255	255	67	71	73.1715	19.9243
	Green	0	255	255	83	81	81.8997	14.5723
	Blue	0	255	255	99	99	98.8707	12.6717

Table 4.6 Basic statistic values from 9 pan-sharpening methods for forestry testing area F2 (F2).

Method	Band	Min	Max	Range	Mode	Median	Mean	Std.
BT	Red	13	184	171	32	35	36.0105	9.8725
	Green	18	198	180	41	41	41.6837	7.3430
	Blue	20	214	194	46	45	45.3939	6.3036
MT	Red	4	125	121	11	14	15.4968	6.4246
	Green	6	119	113	15	17	17.4425	5.0670
	Blue	9	125	116	20	21	21.0045	4.7296
PCA	Red	54	242	188	89	88	88.4373	7.9762
	Green	33	217	184	67	67	67.1456	7.4467
	Blue	34	188	154	69	70	69.7878	4.9899
IHST	Red	0	255	255	0	81	91.0931	67.2361
	Green	0	255	255	0	92	97.0328	65.4622
	Blue	0	255	255	0	113	110.5382	70.6882
MIHST	Red	29	254	225	57	65	68.2629	17.1314
	Green	41	254	213	77	77	78.0535	11.7802
	Blue	46	254	208	92	94	94.8780	10.5560
HPF	Red	0	255	255	69	69	68.9213	19.8439
	Green	25	255	230	78	78	78.1471	11.8090
	Blue	64	255	191	95	94	94.3577	7.2344
WT	Red	0	255	255	0	23	26.2883	21.6952
	Green	0	244	244	0	20	20.6995	14.1842
	Blue	0	230	230	0	12	13.2692	9.2879
EF	Red	57	225	168	76	82	84.5544	11.1058
	Green	65	227	162	87	88	88.8629	7.7447
	Blue	54	229	175	84	85	85.3293	6.8816
GS	Red	0	255	255	66	69	70.6264	19.9348
	Green	0	255	255	81	80	80.2468	14.8616
	Blue	0	255	255	98	97	97.0310	13.0806

Table 4.7 Basic statistic values from 9 pan-sharpening methods for urban testing area 1 (U1).

Method	Band	Min	Max	Range	Mode	Median	Mean	Std.
BT	Red	27	236	209	60	60	61.3699	11.5441
	Green	31	252	221	72	73	74.5302	11.7863
	Blue	27	247	220	73	73	74.2331	10.7606
MT	Red	13	168	155	25	26	27.4556	6.9105
	Green	17	175	158	33	34	34.9400	7.3849
	Blue	21	203	182	46	46	47.1442	8.7326
PCA	Red	59	251	192	103	104	104.7762	10.6173
	Green	56	216	160	85	88	88.9939	10.3519
	Blue	55	214	159	87	87	88.0407	10.9843
IHST	Red	0	255	255	0	79	86.8253	62.7003
	Green	0	255	255	0	89	96.1533	66.9633
	Blue	0	255	255	0	100	107.8313	72.8388
MIHST	Red	55	242	187	74	76	78.4137	11.8814
	Green	66	212	146	84	87	88.1090	9.6396
	Blue	75	183	108	100	103	104.0482	8.7853
HPF	Red	0	255	255	77	78	79.3871	16.2147
	Green	47	235	188	86	88	88.7722	9.2405
	Blue	73	203	130	103	104	104.8745	6.2402
WT	Red	0	255	255	31	31	33.0738	17.0805
	Green	0	255	255	32	32	33.6208	14.3288
	Blue	0	255	255	34	40	39.9865	15.5107
EF	Red	53	229	176	74	76	77.5491	10.9593
	Green	69	203	134	89	90	91.3642	8.3021
	Blue	91	178	87	113	115	115.9699	6.2667
GS	Red	21	255	234	65	67	68.2724	15.1700
	Green	21	255	234	76	76	77.5767	14.1417
	Blue	23	255	232	91	91	92.3697	15.0902

Table 4.8 Basic statistic values from 9 pan-sharpening methods for urban testing area 2 (U2).

Method	Band	Min	Max	Range	Mode	Median	Mean	Std.
BT	Red	32	243	211	56	59	60.7767	12.3079
	Green	44	249	205	70	72	73.7162	12.0151
	Blue	43	244	201	72	72	73.5427	10.6115
MT	Red	12	208	196	25	26	27.1118	8.3254
	Green	17	221	204	33	33	34.4308	8.4926
	Blue	25	230	205	44	45	46.4867	9.4570
PCA	Red	67	249	182	101	102	102.7622	11.7628
	Green	55	251	196	82	84	85.3840	12.0960
	Blue	48	239	191	80	80	81.9253	13.1055
IHST	Red	0	255	255	0	79	87.9007	60.3086
	Green	0	255	255	0	91	97.6068	63.5964
	Blue	0	255	255	255	107	109.8385	68.7096
MIHST	Red	52	242	190	73	75	77.3004	12.3563
	Green	63	212	149	84	85	86.8237	9.7693
	Blue	74	183	109	99	101	102.7783	8.7819
HPF	Red	0	255	255	75	76	78.0283	16.7008
	Green	40	238	198	85	86	87.1408	9.7787
	Blue	74	204	130	101	102	103.0556	6.6446
WT	Red	0	255	255	26	28	30.9289	18.6934
	Green	0	255	255	27	29	30.0344	16.2121
	Blue	0	255	255	34	31	33.7828	17.5622
EF	Red	53	229	176	74	74	75.9735	11.9689
	Green	69	203	134	87	88	89.5547	9.0161
	Blue	92	177	85	111	113	114.2829	6.6762
GS	Red	24	255	231	64	65	67.5344	16.1696
	Green	38	255	217	73	75	76.5584	14.6003
	Blue	24	255	231	89	90	91.2631	15.1207

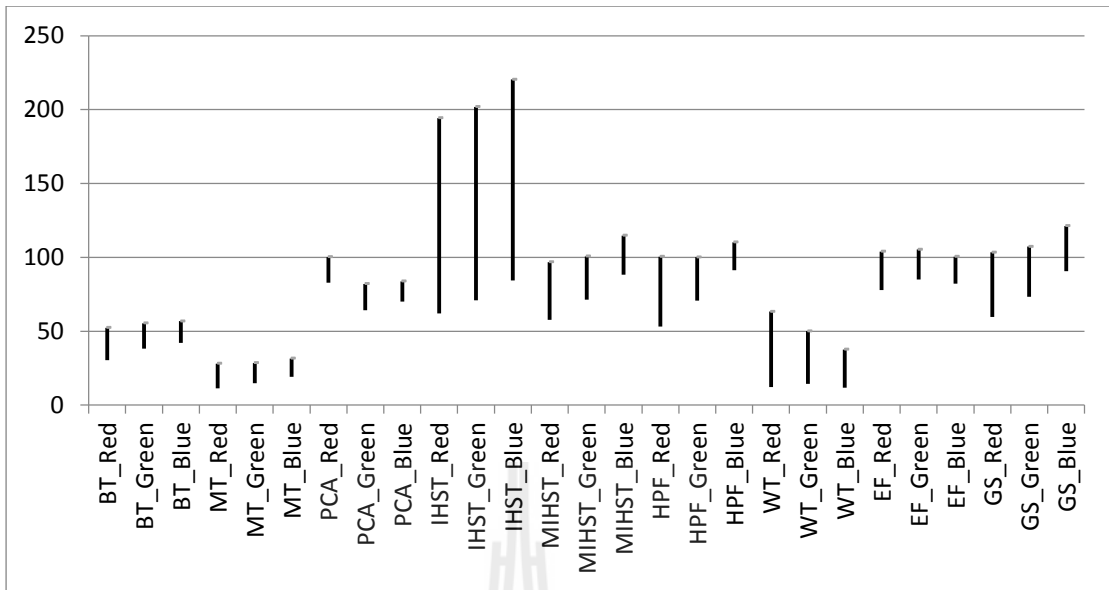


Figure 4.13 ± 1 SD of the mean brightness value of each band of pan-sharpened image from each method for testing area 1(A1).

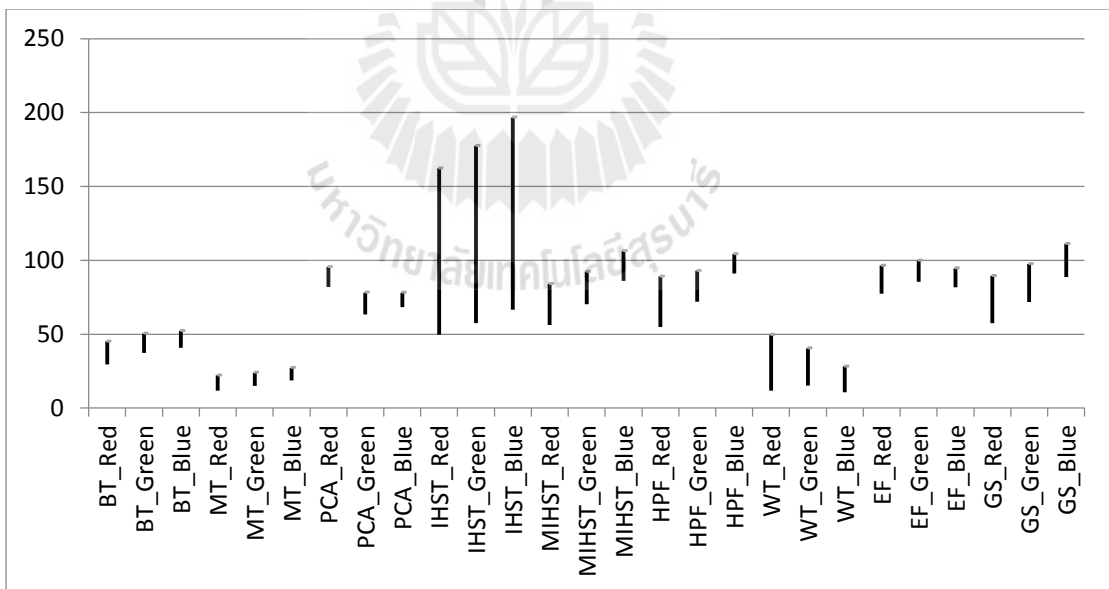


Figure 4.14 ± 1 SD of the mean brightness value of each band of pan-sharpened image from each method for testing area 2 (A2).

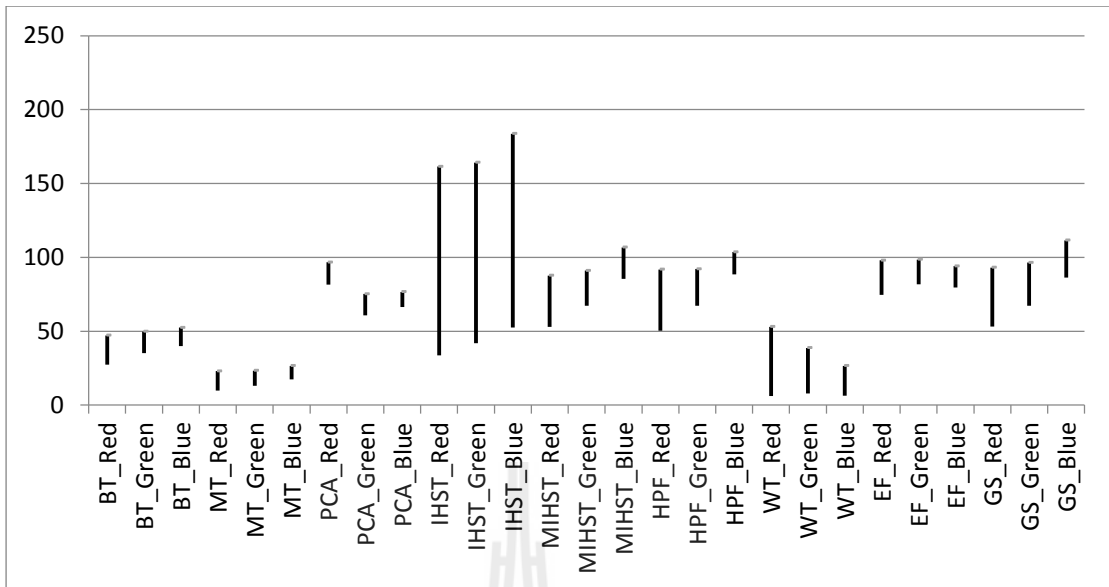


Figure 4.15 ± 1 SD of the mean brightness value of each band of pan-sharpened image from each method for testing area 1 (F1).

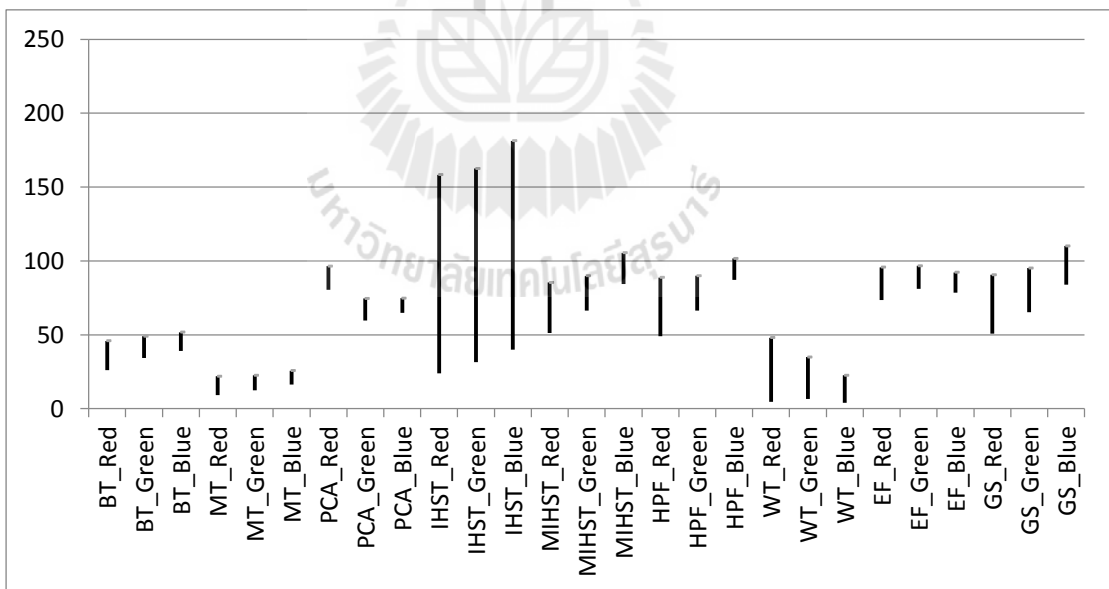


Figure 4.16 ± 1 SD of the mean brightness value of each band of pan-sharpened image from each method for testing area 2 (F2).

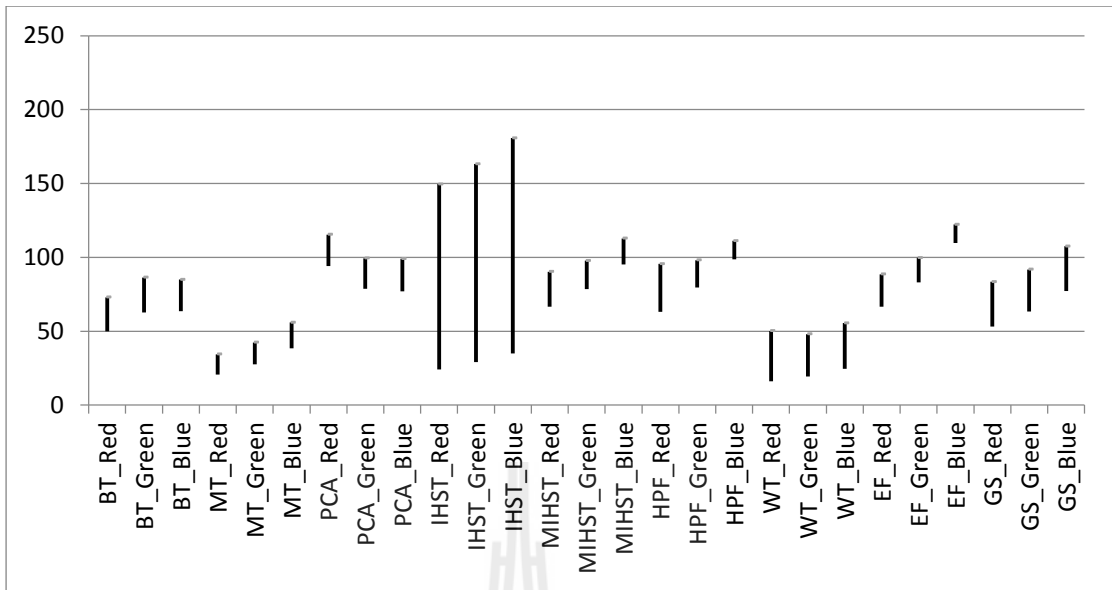


Figure 4.17 ± 1 SD of the mean brightness value of each band of pan-sharpened image from each method for testing area 1 (U1).

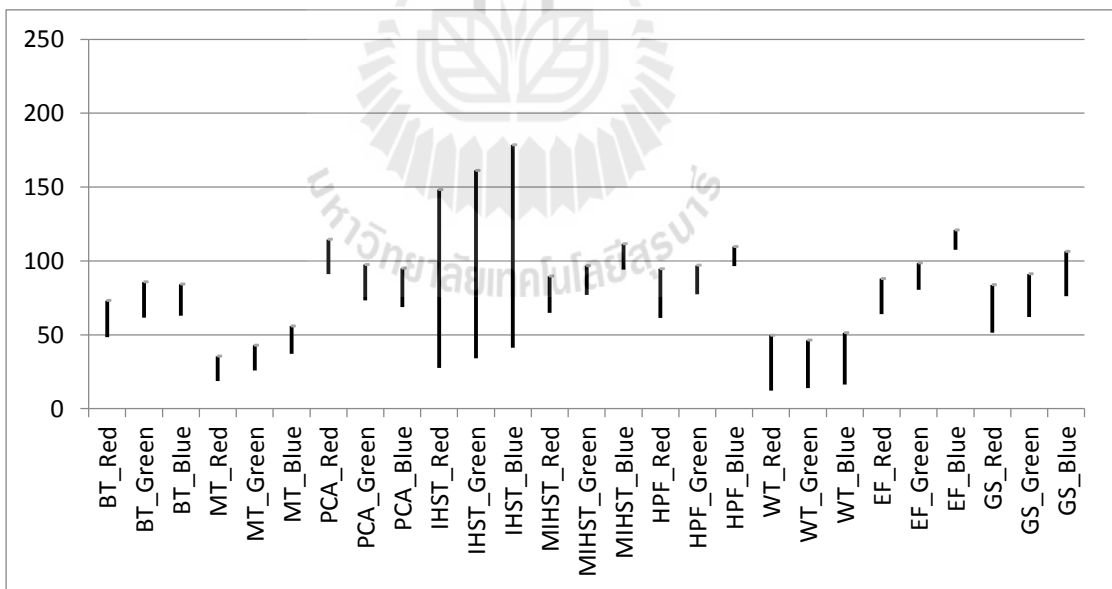


Figure 4.18 ± 1 SD of the mean brightness value of each band of pan-sharpened image from each method for testing area 2 (U2).

4.3 Image quality evaluation

Four image quality criteria including visual image analysis, edge detection evaluation, quality indices, and the effect on classification accuracy, had been used to evaluate the image quality of Thaichote pan-sharpened products by different method in different testing areas for specific application (agriculture, forestry, and urban). The image quality evaluation by each criterion was separately explained with some discussion in the following sections. In addition, total and normalized scores derived from image quality evaluation criteria were here used as baseline to justify and suggest the best pan-sharpening method for Thaichote data accordance with the criteria.

4.3.1 Visual image analysis (VIA)

Basically, fundamental elements of image interpretation included tone, color, size, shape, texture, and pattern were here used to evaluate the image quality in term of VIA by mean of visual judgment. In practice each element was examined and quantified for its properties preservation at three levels: poor (1), moderate (2), and good (3) for visual interpretation. Tables 4.9 - 4.14 are summarized the results of image quality evaluation with theirs values based on visual image analysis for all testing areas.

Table 4.9 Results of image quality evaluation using visual image analysis of agriculture testing area 1 (A1).

Method	Elements of image interpretation						Total score	Interpretability Level	Normalized score (0-10)
	Tone	Color	Size	Shape	Texture	Pattern			
BT	2	3	2	2	3	3	15	High	8
MT	1	1	1	1	1	1	6	Low	3
PCA	3	3	3	3	3	3	18	High	10
IHST	3	1	3	3	2	3	15	High	8
MIHST	3	3	3	3	2	3	17	High	9
HPF	3	3	3	3	3	3	18	High	10
WT	3	3	1	1	1	1	10	Low	5
EF	3	2	2	3	1	2	13	Moderate	7
GS	3	3	3	3	3	3	18	High	10

Table 4.10 Results of image quality evaluation using visual image analysis of agriculture testing area 2 (A2).

Method	Elements of image interpretation						Total score	Interpretability Level	Normalized score (0-10)
	Tone	Color	Size	Shape	Texture	Pattern			
BT	2	3	2	3	3	3	16	High	8
MT	1	1	1	1	2	1	7	Low	3
PCA	3	3	3	3	2	3	17	High	9
IHST	3	1	3	3	3	3	16	High	8
MIHST	3	3	3	3	2	3	17	High	9
HPF	3	3	3	3	2	3	17	High	9
WT	3	3	1	1	1	1	10	Low	5
EF	3	3	3	3	1	2	15	High	8
GS	3	3	3	3	3	3	18	High	10

Table 4.11 Results of image quality evaluation using visual image analysis of forestry testing area 1 (F1).

Method	Elements of image interpretation						Total score	Interpretability Level	Normalized score (0-10)
	Tone	Color	Size	Shape	Texture	Pattern			
BT	2	3	3	3	3	3	17	High	9
MT	1	1	3	3	1	3	12	Moderate	6
PCA	2	3	2	2	2	2	13	Moderate	7
IHST	1	1	3	3	1	2	11	Moderate	6
MIHST	3	2	3	3	2	2	15	High	8
HPF	3	2	3	3	3	3	17	High	9
WT	2	1	1	1	1	1	7	Low	3
EF	3	2	2	3	1	2	13	Moderate	7
GS	3	3	3	3	3	3	18	High	10

Table 4.12 Results of image quality evaluation using visual image analysis of forestry testing area 2 (F2).

Method	Elements of image interpretation						Total score	Interpretability Level	Normalized score (0-10)
	Tone	Color	Size	Shape	Texture	Pattern			
BT	2	3	3	3	3	3	17	High	9
MT	1	1	2	2	2	1	9	Low	5
PCA	3	3	2	2	2	2	14	Moderate	7
IHST	1	1	1	1	2	2	8	Low	4
MIHST	3	2	2	2	2	1	12	Moderate	6
HPF	3	2	3	3	3	3	17	High	9
WT	2	1	1	1	1	1	7	Low	3
EF	3	2	2	2	1	2	12	Moderate	6
GS	2	3	3	3	3	3	17	High	9

Table 4.13 Results of image quality evaluation using visual image analysis of urban testing area 1 (U1).

Method	Elements of image interpretation						Total score	Interpretability Level	Normalized score (0-10)
	Tone	Color	Size	Shape	Texture	Pattern			
BT	3	2	3	3	2	3	16	High	8
MT	1	1	2	1	1	1	7	Low	3
PCA	3	2	2	1	1	1	10	Low	5
IHST	3	1	2	2	2	1	11	Moderate	6
MIHST	3	1	2	2	2	2	12	Moderate	6
HPF	2	2	2	3	2	3	14	Moderate	7
WT	2	1	1	1	1	1	7	Low	3
EF	1	1	2	3	1	2	10	Low	5
GS	3	2	3	3	2	3	16	High	8

Table 4.14 Results of image quality evaluation using visual image analysis of urban testing area 2 (U2).

Method	Elements of image interpretation						Total score	Interpretability Level	Normalized score (0-10)
	Tone	Color	Size	Shape	Texture	Pattern			
BT	3	2	3	3	2	3	16	High	8
MT	1	1	2	2	2	2	10	Low	5
PCA	2	2	1	1	1	1	8	Low	4
IHST	3	1	2	2	2	1	11	Moderate	6
MIHST	3	2	3	3	2	3	16	High	8
HPF	3	3	3	3	3	2	17	High	9
WT	1	1	1	1	1	1	6	Low	3
EF	2	3	2	2	1	2	12	Moderate	6
GS	3	3	3	3	3	3	18	High	10

As results, it was found that the ranking pattern of the evaluation result for agricultural application in both testing areas (A1 and A2) was identical based on the original total scores (Tables 4.9 - 4.10). The lowest interpretability level in both testing areas is MT while, the highest interpretability level is GS. However, six pan-sharpening methods for testing area 1 (A1) included BT, PCA, IHST, MIHST, HPF, and GS methods had a high-level capability for visual interpretation while the visual interpretability level of EF method had moderate level and MT and WT methods had

a low interpretability level. At the same time, seven pan-sharpening methods for testing area 2 (A2) included BT, PCA, IHST, MIHST, HPF, EF, and GS methods provided the visual interpretation at high level while MT and WT methods had a low interpretability level. Consequently, most of pan-sharpening methods included BT, PCA, IHST, MIHST, HPF, and GS methods provided a high interpretability level for agriculture application.

For forestry application, it was found that the pattern of the results of image quality evaluation in both testing areas (F1 and F2) were not identical according to the original total scores (see Tables 4.11 - 4.12). The most inappropriate method in both testing areas was WT while the most appropriate method was GS. However, four pan-sharpening methods in forestry testing area 1 (F1) included BT, HPF, MIHST, and GS methods provided the high-level capability and IHST, EF, MT, and PCA methods provided a moderate level of visual interpretability, while WT delivered a low interpretability level. At the same time, three pan-sharpening methods in testing area 2 (F2) included BT, HPF, and GS methods had a high interpretability level and MIHST, EF, and PCA methods have a moderate level while MT, IHST, and WT methods had a low interpretability level. Consequently, BT, HPF, and GS methods provided the high interpretability level for forestry application.

Focusing on urban application, the ranking pattern for visual interpretation of both testing area (U1 and U2) were not identical based on the original total score (see Tables 4.13 - 4.14). The slightly suitable method for visual image analysis in both testing areas was WT while, the most suitable method was GS.

For urban application, BT and GS provided a high interpretability level and the IHST, MIHST, and HPFT methods had a moderate level of visual

interpretability, while MT, PCA, EF, and WT methods delivered a low interpretability level in testing area 1 (U1). In addition, BT, HPF, MIHST, and GS methods had a high level of visual interpretability and the EF and IHST methods had a moderate interpretability level while, PCA, MT, and WT methods provided a low capacity for visual interpretability. Noticeably, BT and GS methods had a high interpretability level for urban application.

In summary, it can be here concluded that the most appropriate method for producing Thaichote pan-sharpened image to the three applications (agriculture, forestry, and urban) with respect to visual image analysis were BT and GS methods. This finding was similar to the previous work of Zhang and Mishra (2012), who applied visual image analysis for image quality evaluation. They concluded that GS can produce high quality pan-sharpened image from the very high spatial resolution images including IKONOS, QuickBird, and GeoEye-1 except WorldView-2 images.

4.3.2 Edge detection analysis (EDA)

Fundamentally, edge detection analysis was firstly separately performed on the original PAN and pan-sharpened images and their results (See example in Figures 4.19 - 4.20) were then used to compute correlation coefficient (CC) for indicating the performance of all pan-sharpening methods according to the edge structure preservation. The result of image quality evaluation based on edge detection analysis with their values for all testing areas are summarized as shown in Tables 4.15 - 4.20.

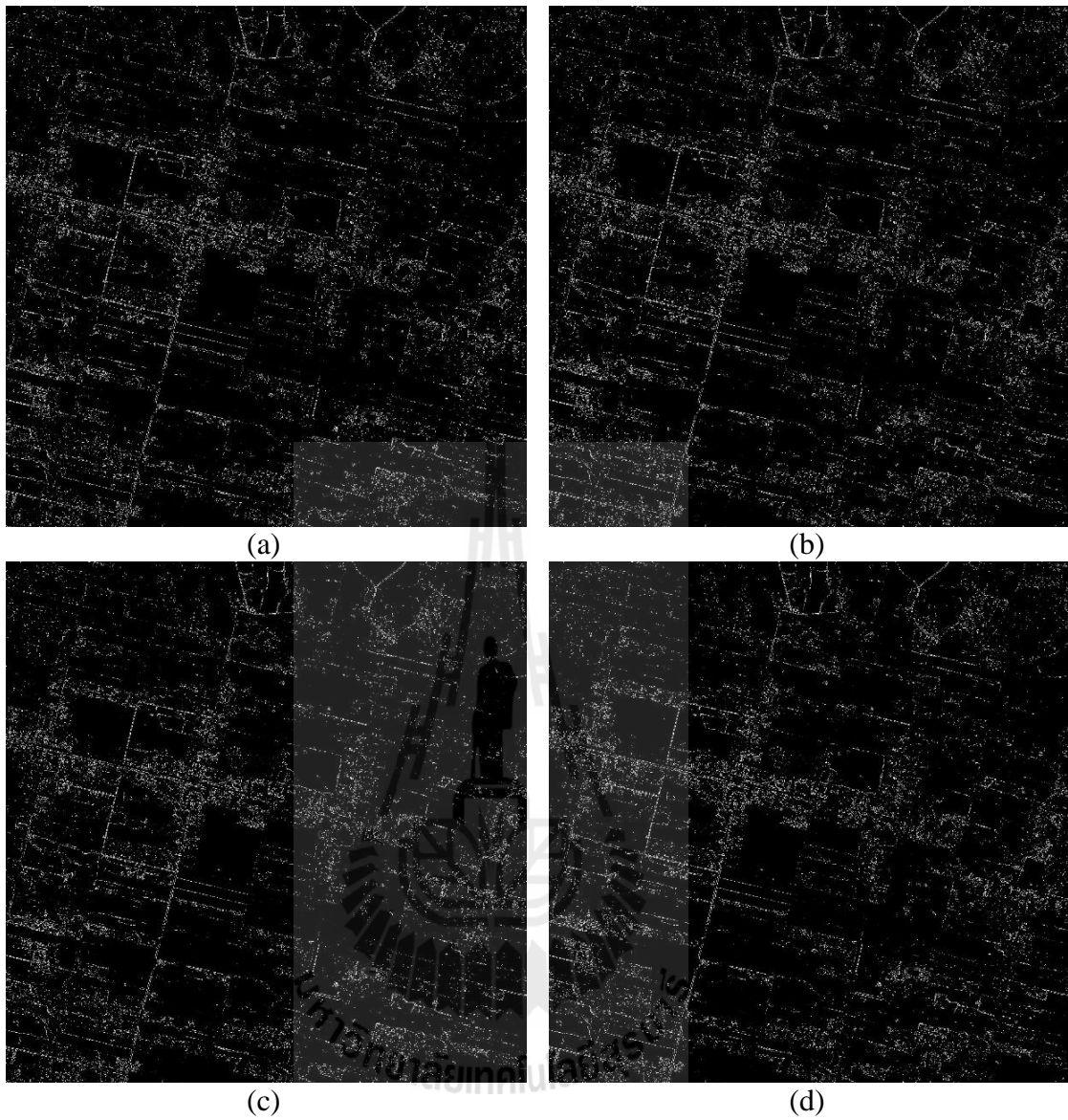


Figure 4.19 Edge detected images using Sobel operator from: (a) panchromatic image, (b) pan-sharpened image band 1, (c) pan-sharpened image band 2, and (d) pan-sharpened image band 3 of HPF method.

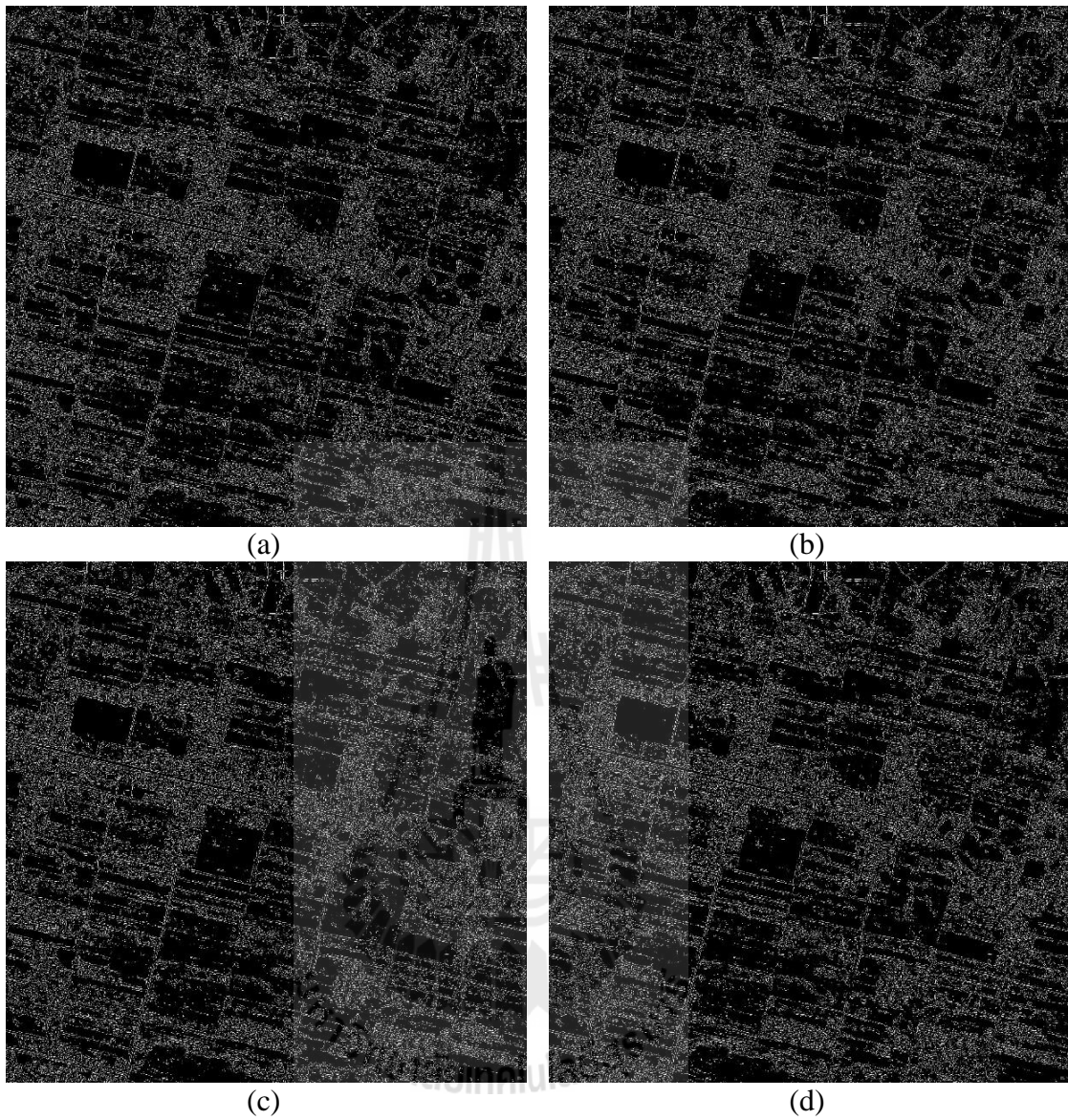


Figure 4.20 Edge detected images using Laplacian operator from: (a) panchromatic image, (b) pan-sharpened image band 1, (c) pan-sharpened image band 2, and (d) pan-sharpened image band 3 of HPF method.

Table 4.15 CC values from Sobel and Laplacian operator and its normalized score of agriculture testing area 1 (A1).

Method	Sobel	Laplacian	Total score	Normalized score (0-10)
BT	0.7087	0.5503	1.2590	6
MT	0.5331	0.4531	0.9862	5
PCA	0.5731	0.4296	1.0027	5
IHST	0.6076	0.7383	1.3459	7
MIHST	0.7008	0.5324	1.2332	6
HPF	0.8867	0.7531	1.6398	8
WT	0.0238	0.0058	0.0296	0
EF	0.7246	0.4976	1.2222	6
GS	0.7872	0.5922	1.3794	7

Table 4.16 CC values from Sobel and Laplacian operator and its normalized score of agriculture testing area 2 (A2).

Method	Sobel	Laplacian	Total score	Normalized score (0-10)
BT	0.7114	0.5076	1.2190	6
MT	0.5664	0.4580	1.0244	5
PCA	0.5831	0.3918	0.9749	5
IHST	0.7633	0.7816	1.5449	8
MIHST	0.6864	0.4775	1.1639	6
HPF	0.8903	0.7248	1.6151	8
WT	0.0216	0.0122	0.0338	0
EF	0.7156	0.4585	1.1741	6
GS	0.7813	0.5422	1.3235	7

Table 4.17 CC values from Sobel and Laplacian operator and its normalized score of forestry testing area 1 (F1).

Method	Sobel	Laplacian	Total score	Normalized score (0-10)
BT	0.6833	0.5676	1.2509	6
MT	0.5534	0.4973	1.0507	5
PCA	0.5676	0.4407	1.0083	5
IHST	0.7008	0.7896	1.4904	7
MIHST	0.6561	0.5249	1.1810	6
HPF	0.8895	0.7758	1.6653	8
WT	0.0199	0.0044	0.0243	0
EF	0.6965	0.5073	1.2038	6
GS	0.7611	0.6111	1.3722	7

Table 4.18 CC values from Sobel and Laplacian operator and its normalized score of forestry testing area 2 (F2).

Method	Sobel	Laplacian	Total score	Normalized score (0-10)
BT	0.6940	0.5673	1.2613	6
MT	0.5398	0.4996	1.0394	5
PCA	0.5879	0.4435	1.0314	5
IHST	0.7028	0.7719	1.4747	7
MIHST	0.6380	0.5212	1.1592	6
HPF	0.8934	0.7738	1.6672	8
WT	0.0063	0.0023	0.0086	0
EF	0.6953	0.5056	1.2009	6
GS	0.7934	0.6153	1.4087	7

Table 4.19 CC values from Sobel and Laplacian operator and its normalized score of urban testing area 1 (U1).

Method	Sobel	Laplacian	Total score	Normalized score (0-10)
BT	0.8652	0.7369	1.6021	8
MT	0.7777	0.6496	1.4273	7
PCA	0.0288	0.0168	0.0456	0
IHST	0.6291	0.8243	1.4534	7
MIHST	0.7917	0.6739	1.4656	7
HPF	0.9038	0.7607	1.6645	8
WT	0.0124	0.0053	0.0177	0
EF	0.7740	0.5622	1.3362	7
GS	0.9197	0.7606	1.6803	8

Table 4.20 CC values from Sobel and Laplacian operator and its normalized score of urban testing area 2 (U2).

Method	Sobel	Laplacian	Total score	Normalized score (0-10)
BT	0.8592	0.7257	1.5849	8
MT	0.7622	0.6382	1.4004	7
PCA	0.0330	0.0162	0.0492	0
IHST	0.6297	0.8256	1.4553	7
MIHST	0.7789	0.6483	1.4272	7
HPF	0.9035	0.7621	1.6656	8
WT	0.0082	0.0018	0.0100	0
EF	0.7688	0.5547	1.3235	7
GS	0.9131	0.7496	1.6627	8

According to the results, it was found that the most unappropriated method in term of edge detection analysis using Sobel and Laplacian operators for agriculture application in the testing area 1 (A1) was WT method with value of 0.0238 and 0.0058 while, HPF method is the most appropriate method with value of 0.8867 and 0.7531, Meanwhile the most unsuitable method by means of edge detection analysis

in testing area 2 (A2) was WT method with value of 0.0216 and 0.0122. In contrast, the most suitable methods were HPF with value of 0.8903 and IHST with value of 0.7816. However, WT method delivered a lowest total score in both testing areas (A1 and A2) with the value of 0.0296 and 0.0338 respectively. In contrast, HPF method provided a highest total score (1.6398 and 1.6151) in both urban testing areas. These results imply that the most appropriate pan-sharpening method for agriculture application using Thaichote data, which provides a highly preserve edge detection structure when it compares the edge detected image produced from the original PAN image and pan-sharpened image, was HPF method. In addition, results showed that the IHST method was also possible to apply as an appropriate method to the agriculture application because it had the same highest normalized score.

Focusing on the forestry application, the lowest CC values in term of edge detection analysis using Sobel and Laplacian operators in testing area 1 (F1) was computed from the WT method with value of 0.0199 and 0.0044 respectively. In contrast, HPF method provided a highest CC value (0.8895) when using the Sobel operator while the IHST method delivered a highest CC value (0.7896) when considering with the Laplacian operator in testing area 1 (F1). Meanwhile, the lowest CC values in the testing area 2 (F2) was the pan-sharpened image processed from WT method with value of 0.0063 and 0.0023. On the contrary, HPF method provided the highest CC values computed from both operators (Sobel and Laplacian) with the value for 0.8934 and 0.7738 respectively. However, the total score of CC showed the most unappropriated method for both testing areas was WT method with the total score of 0.0243 and 0.0086 respectively. In contrast, the most appropriated method was HPF with the total score of 1.6653 and 1.6672 respectively. These results imply

that the most appropriate pan-sharpening method for forestry application using Thaichote data, which provides a highly preserved edge structure, was HPF.

For urban application, the lowest CC value in testing area 1 (U1) was the resulting image processed from WT method with the CC value of 0.0124 and 0.0053. In contrast, GS method provided the highest CC value of 0.9197 (Sobel operator) and the IHST method also provided with the highest CC value of 0.8243 (Laplacian operator). Meanwhile, the resulting image processed from WT method provided a lowest CC value in testing area 2 (U2) with CC value of 0.0082 (Sobel operator) and 0.0018 (Laplacian operator) respectively. On the contrary, GS method provided the highest CC value of 0.9131 (Sobel operator) and HPF delivered the highest CC value of 0.8256 (Laplacian operator) in urban testing area 2. In addition, WT method has a lowest total score in both testing areas (0.0177 and 0.0100). However, the first two highest total score in testing area 1 (U1) was the pan-sharpened image processed from GS method (1.6803) and the HPF method (1.6645) while the first two highest total score in testing area 2 (U2) was the image enhanced by HPF method (1.6656) and GS method (1.6627). These results imply that the most appropriate pan-sharpening method for urban application which provides a highly preserve edge detection structure, was GS or HPF.

In summary, it is concluded that HPF method is the most appropriate method for producing the Thaichote pan-sharpened image for three applications (agriculture, forestry, and urban) by mean of edge detection analysis using Sobel operator. This finding is similar to the previous work of Klonus and Ehlers (2009), who applied edge detection (ED) using Sobel operator as one of indicators for pan-sharpening method evaluation. They concluded that HPF method can detect edge in

the pan-sharpened data from Formosat image with average CC value of 94.98%.

In addition, the most appropriate method for edge detection using Laplacian operator for the three applications (agriculture, forestry, and urban) was IHST method.

4.3.3 Quality indices (QI)

Seven quality indices included correlation coefficient (CC), relative shift of the mean (RM), root mean square error (RMSE), relative average spectral error (RASE), relative dimensionless global error in synthesis (ERGAS), spectral angle mapping (SAM), and universal image quality index (UIQI) were here applied to measure the quantitative image distortion. Basically, pixel value of MS image and pan-sharpened images were used to compute and evaluate the image quality by means of statistical data. This approach is frequently used to determine the spectral distortion testing image and it can be compared easily to another quality indicator because the evaluation result is a quantitative value. Results of an image quality assessment by quality indices from the different pan-sharpening methods in each testing area for each specific application were summarized as shown in Tables 4.21 - 4.26.

Meanwhile, the derived result of image quality evaluation by the selected quality indices except CC and UIQI were normalized by Min-Max stretching method as total score and its total score were renormalized at the normalize scale of 1-10 as shown in Tables 4.27 - 4.32.

Table 4.21 Results of image quality evaluation using QI of agriculture testing area 1

(A1).

Method	CC	RM	RMSE	RASE	ERGAS	SAM	UIQI
BT	0.6520	-46.1324	41.5953	47.9686	6.4180	10.1211	0.5247
MT	0.7742	-74.9528	65.4676	76.0515	10.1405	12.2782	0.2832
PCA	0.1932	-2.4834	19.5419	22.5143	3.0596	13.1665	0.5657
IHST	0.4438	56.7907	79.2170	89.7525	12.0030	23.0010	0.1634
MIHST	0.7527	-0.8951	12.8837	14.6246	1.9595	8.1622	0.5492
HPF	0.6918	-1.3926	14.4115	17.4518	2.4891	9.8456	0.5729
WT	0.2913	-57.7950	54.0066	61.5291	8.3301	30.1983	0.4323
EF	0.6880	6.6946	13.6078	16.0383	2.1808	8.4466	0.7681
GS	0.7336	4.1498	15.1881	17.8942	2.4064	9.2837	0.6280

Table 4.22 Results of image quality evaluation using QI of agriculture testing area 2

(A2).

Method	CC	RM	RMSE	RASE	ERGAS	SAM	UIQI
BT	0.7339	-46.1395	37.0637	47.4607	6.3495	8.9829	0.5429
MT	0.8238	-77.3986	60.7154	78.3366	10.4451	11.0604	0.2761
PCA	0.0866	1.9561	18.7619	24.3185	3.3988	14.3206	0.6288
IHST	0.5313	25.7310	64.3475	81.4724	10.8922	29.8403	0.2015
MIHST	0.8553	0.7902	9.0630	11.4658	1.5329	6.3365	0.6154
HPF	0.7549	1.0067	11.3393	15.4111	2.2240	8.5414	0.5950
WT	0.3131	-66.7362	54.4047	68.6886	9.3248	36.3984	0.4194
EF	0.6721	11.3764	13.8335	18.4798	2.5808	8.7304	0.7192
GS	0.8142	3.7467	11.8733	15.5481	2.0887	8.0021	0.6244

Table 4.23 Results of image quality evaluation using QI of forestry testing area 1

(F1).

Method	CC	RM	RMSE	RASE	ERGAS	SAM	UIQI
BT	0.6522	-46.4329	38.5206	48.0889	6.4330	9.6899	0.4636
MT	0.7662	-77.0373	62.0746	78.0524	10.4074	11.3023	0.2426
PCA	-0.0041	0.4246	19.3530	24.3417	3.3448	14.2801	0.5275
IHST	0.5152	30.1376	62.2444	76.5926	10.2438	26.9519	0.2039
MIHST	0.8007	-0.3282	10.6318	13.2306	1.7923	7.3051	0.5547
HPF	0.6991	0.3710	12.5697	16.6146	2.3963	9.3015	0.5167
WT	0.2281	-64.2250	54.4914	67.1072	9.0933	34.8984	0.3635
EF	0.6116	10.0917	14.0988	18.2610	2.5325	8.9526	0.6599
GS	0.7816	3.2720	12.2707	15.6898	2.1130	8.2120	0.5793

Table 4.24 Results of image quality evaluation using QI of forestry testing area 2 (F2).

Method	CC	RM	RMSE	RASE	ERGAS	SAM	UIQI
BT	0.7339	-46.1395	37.0637	47.4607	6.3495	8.9829	0.5429
MT	0.8238	-77.3986	60.7154	78.3366	10.4451	11.0604	0.2761
PCA	0.0866	1.9561	18.7619	24.3185	3.3988	14.3206	0.6288
IHST	0.5313	25.7310	64.3475	81.4724	10.8922	29.8403	0.2015
MIHST	0.8553	0.7902	9.0630	11.4658	1.5329	6.3365	0.6154
HPF	0.7549	1.0067	11.3393	15.4111	2.2240	8.5414	0.5950
WT	0.3131	-66.7362	54.4047	68.6886	9.3248	36.3984	0.4194
EF	0.6721	11.3764	13.8335	18.4798	2.5808	8.7304	0.7192
GS	0.8142	3.7467	11.8733	15.5481	2.0887	8.0021	0.6244

Table 4.25 Results of image quality evaluation using QI of urban testing area 1 (U1).

Method	CC	RM	RMSE	RASE	ERGAS	SAM	UIQI
BT	0.6554	-25.2977	25.0490	27.7446	3.7462	9.0609	0.4704
MT	0.8385	-61.4483	55.2595	61.9702	8.2769	10.9257	0.4167
PCA	0.1015	7.0746	17.4420	19.8236	2.8856	11.2627	0.6644
IHST	0.2856	5.1651	65.5860	71.2510	9.5081	33.5922	0.0751
MIHST	0.7993	-2.4765	9.2389	10.1397	1.3632	5.5874	0.4349
HPF	0.6947	-0.4754	11.5170	13.5169	1.9917	7.8200	0.4693
WT	0.4368	-57.4758	54.4675	60.3423	8.0696	25.0605	0.3473
EF	0.9097	1.2386	7.9247	8.7803	1.1796	4.8409	0.6857
GS	0.7095	-14.9468	18.9916	21.3323	2.8578	10.0036	0.4143

Table 4.26 Results of image quality evaluation using QI of urban testing area 2 (U2).

Method	CC	RM	RMSE	RASE	ERGAS	SAM	UIQI
BT	0.6439	-24.3457	24.0863	26.7558	3.6176	8.7605	0.5474
MT	0.8383	-61.1453	54.7114	61.6609	8.2361	11.5610	0.4679
PCA	0.0584	5.4187	18.6072	21.0492	3.0296	12.2711	0.6764
IHST	0.3367	9.2473	62.0079	68.9616	9.2044	31.4284	0.1029
MIHST	0.8276	-1.5816	8.5847	9.6450	1.2976	5.3591	0.5571
HPF	0.6908	-0.4333	11.3007	13.1969	1.9309	7.7132	0.5296
WT	0.3954	-58.8650	55.6356	61.9292	8.3300	28.3617	0.3427
EF	0.8927	1.5330	8.1496	9.0524	1.2193	5.0065	0.7310
GS	0.7154	-13.6678	17.7510	19.9715	2.6688	9.4995	0.4956

Table 4.27 Normalized values of QI results as total score and normalized score of agriculture testing area 1 (A1).

Method	Quality indices							Total score	Normalized score (0-10)
	CC	RM	RMSE	RASE	ERGAS	SAM	UIQI		
BT	6.5200	3.8920	5.6716	5.5617	5.5608	9.1110	5.2473	41.5644	6
MT	7.7420	0.0000	2.0728	1.8237	1.8544	8.1322	2.8323	24.4574	4
PCA	1.9320	9.7860	8.9963	8.9498	8.9047	7.7290	5.6578	51.9556	8
IHST	4.4380	2.4520	0.0000	0.0000	0.0000	3.2661	1.6340	11.7901	2
MIHST	7.5270	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	5.4927	63.0197	9
HPF	6.9180	9.9330	9.7697	9.6237	9.4727	9.2361	5.7288	60.6820	9
WT	2.9130	2.3170	3.8006	3.7567	3.6570	0.0000	4.3235	20.7678	3
EF	6.8800	9.2170	9.8908	9.8118	9.7797	9.8709	7.6813	63.1315	9
GS	7.3360	9.5610	9.6526	9.5648	9.5550	9.4911	6.2800	61.4405	9

Table 4.28 Normalized values of QI results as total score and normalized score of agriculture testing area 2 (A2).

Method	Quality indices							Total score	Normalized score (0-10)
	CC	RM	RMSE	RASE	ERGAS	SAM	UIQI		
BT	6.8570	3.8650	4.7488	4.7074	5.5608	8.9613	4.2640	38.9643	6
MT	7.6640	0.0000	0.5620	0.4174	1.8544	8.5848	2.1655	21.2481	3
PCA	1.6950	9.9630	8.5155	8.4883	8.9047	7.2649	4.9488	49.7802	7
IHST	3.3330	4.6830	0.0000	0.0000	0.0000	1.9919	1.0087	11.0166	2
MIHST	7.7210	9.7740	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	4.5033	61.9983	9
HPF	7.5340	10.0000	9.9066	9.8007	9.4727	9.6199	5.6315	61.9654	9
WT	3.0810	2.0230	2.4737	2.5418	3.6570	0.0000	4.3748	18.1513	3
EF	6.6830	8.9630	9.5330	9.4530	9.7797	9.4713	6.8375	60.7205	9
GS	7.6880	9.8040	9.6362	9.5758	9.5550	9.4355	5.0525	60.7470	9

Table 4.29 Normalized values of QI results as total score and normalized score of forestry testing area 1 (F1).

Method	Quality indices							Total score	Normalized score (0-10)
	CC	RM	RMSE	RASE	ERGAS	SAM	UIQI		
BT	6.5220	3.9900	4.5965	4.6224	4.6133	9.1357	4.6360	38.1159	6
MT	7.6620	0.0000	0.0329	0.0000	0.0000	8.5514	2.4258	18.6721	3
PCA	0.0410	9.9870	8.3103	8.2859	8.1979	7.4722	5.2750	47.5693	7
IHST	5.1520	6.1140	0.0000	0.2252	0.1899	2.8799	2.0390	16.6000	2
MIHST	8.0070	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	5.5470	63.5540	9
HPF	6.9910	9.9940	9.6245	9.4780	9.2989	9.2765	5.1673	59.8302	8
WT	2.2810	1.6700	1.5022	1.6885	1.5253	0.0000	3.6348	12.3018	2
EF	6.1160	8.7270	9.3283	9.2240	9.1408	9.4029	6.5985	58.5375	8
GS	7.8160	9.6160	9.6825	9.6206	9.6277	9.6713	5.7933	61.8274	9

Table 4.30 Normalized values of QI results as total score and normalized score of forestry testing area 2 (F2).

Method	Quality indices							Total score	Normalized score (0-10)
	CC	RM	RMSE	RASE	ERGAS	SAM	UIQI		
BT	7.3390	4.0800	4.9352	4.8584	4.8537	9.1197	5.4290	40.6150	6
MT	8.2380	0.0000	0.6570	0.4479	0.4777	8.4286	2.7610	21.0102	3
PCA	0.8660	9.8480	8.2456	8.1641	8.0064	7.3441	6.2880	48.7622	7
IHST	5.3130	6.7440	0.0000	0.0000	0.0000	2.1815	2.0147	16.2532	2
MIHST	8.5530	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	6.1543	64.7073	9
HPF	7.5490	9.9720	9.5883	9.4364	9.2616	9.2665	5.9495	61.0233	9
WT	3.1310	1.3920	1.7985	1.8261	1.6747	0.0000	4.1935	14.0158	2
EF	6.7210	8.6180	9.1371	8.9981	8.8804	9.2037	7.1923	58.7506	8
GS	8.1420	9.6140	9.4917	9.4169	9.4062	9.4459	6.2443	61.7610	9

Table 4.31 Normalized values of QI results as total score and normalized score of urban testing area 1 (U1).

Method	Quality indices							Total score	Normalized score (0-10)
	CC	RM	RMSE	RASE	ERGAS	SAM	UIQI		
BT	6.5540	5.9290	7.0302	6.9643	6.9183	8.5322	4.7038	46.6318	7
MT	8.3850	0.0000	1.7909	1.4856	1.4783	7.8836	4.1665	25.1899	3
PCA	1.0150	8.9177	8.3494	8.2322	7.9516	7.7664	6.6435	48.8758	7
IHST	2.8560	9.2309	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7513	12.8382	2
MIHST	7.9930	9.6718	9.7721	9.7824	9.7796	9.7404	4.3490	61.0883	9
HPF	6.9470	10.0000	9.3770	9.2418	9.0249	8.9638	4.6928	58.2473	8
WT	4.3680	0.6515	1.9282	1.7462	1.7272	2.9674	3.4725	16.8610	2
EF	9.0970	9.8748	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	6.8565	65.8283	9
GS	7.0950	7.6266	8.0807	7.9907	7.9850	8.2044	4.1433	51.1257	7

Table 4.32 Normalized values of QI results as total score and normalized score of urban testing area 2 (U2).

Method	Quality indices							Total score	Normalized score (0-10)
	CC	RM	RMSE	RASE	ERGAS	SAM	UIQI		
BT	6.4390	6.0613	7.0410	7.0450	6.9965	8.5792	5.4743	47.6363	7
MT	8.3830	0.0000	1.3548	1.2186	1.2126	7.5193	4.6793	24.3676	3
PCA	0.5840	9.1788	8.0583	7.9975	7.7329	7.2505	6.7638	47.5658	7
IHST	3.3670	8.5482	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0293	12.9445	2
MIHST	8.2760	9.8109	9.9192	9.9011	9.9019	9.8666	5.5713	63.2470	9
HPF	6.9080	10.0000	9.4149	9.3082	9.1088	8.9756	5.2955	59.0110	8
WT	3.9540	0.3756	1.1832	1.1738	1.0950	1.1607	3.4273	12.3696	2
EF	8.9270	9.8189	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	7.3098	66.0557	9
GS	7.1540	7.8201	8.2173	8.1774	8.1847	8.2995	4.9555	52.8085	7

Referring to Tables 4.21 - 4.22 for image quality assessment of agriculture application in both testing areas (A1 and A2), it was found that the most dominant method based on index value and its frequency, which provided the minimum spectral deviation, was MIHST while IHST provided the maximum spectral deviation in both

testing areas. Similarly, the most appropriate method for Thaichote pan-sharpening for agriculture application in both testing areas (A1 and A2) based on the total score was also MIHST with value of 63.0197 and 61.9983. On the contrary, the most inappropriate method was also IHST with value of 11.7901 and 11.0166 (Tables 4.27 - 4.28). These results imply that the most appropriate pan-sharpening method for agriculture application, which provided a minimum spectral deviation, was MIHST. However, the normalized total score of both testing areas for agriculture application which showed the possible appropriate methods for Thaichote pan-sharpening may also include HPF, EF, and GS. This possibility may be useful according to digital image processing software availability.

For image quality assessment of forestry application (see Tables 4.23 - 4.24) in both testing areas (F1 and F2), it can be observed that an outstanding method was MIHST while WT method provided a poor image quality with maximum spectral deviation in both testing areas. Similarly, the outstanding method for Thaichote pan-sharpening in both forestry testing areas (F1 and F2) based on the total score was also MIHST with value of 63.5540 and 64.7073. Meanwhile, the most inappropriate method was WT with value of 12.3018 and 14.0158. These results suggest that the most appropriate Thaichote pan-sharpening method for forestry application was MIHST. However, the normalized total score of both testing areas for forestry application which showed the alternative methods for Thaichote pan-sharpening may also include HPF and GS. This solution may be useful and can be applied in the real practice according to digital image processing software availability.

In case of urban application, results of image quality assessment (Tables 4.25 - 4.26) in both testing areas (U1 and U2), seem to suggest that the dominant

method which provided the minimum spectral deviation was EF whereas WT provided the maximum spectral deviation in both testing areas. Similarly, the dominant method for Thaichote pan-sharpening in both urban testing areas (U1 and U2) according to the total score was also EF (65.8283 and 66.0557) but the most inappropriate method of U1 was IHST (12.8382) and U2 was WT (12.3696). These results can be concluded that the most appropriate Thaichote pan-sharpening method for urban application was EF. Moreover, MIHST can be chosen as alternative method because its normalized total score was same as EF method (Tables 4.31 - 4.32).

In summary, it comes to the conclusion that the most appropriate method for Thaichote pan-sharpening production of three applications (agriculture, forestry and urban) according to quality indices was MIHST. This finding was similar to the previous work of Li and Li (2010), who applied eight pan-sharpening methods (BT, MIHST, PCA, HPF, SFIM, W+PCA, EF, and Region) with QuickBird data in City of Wuhan, China. They concluded that MIHST fused image had the lowest difference of information based on cross entropy (CE) and lower noise according to weighted signal to noise ratio (WSNR). In contrast, Intajag et al. (2010) who applied four pan-sharpening methods: IHST, Choi method, Tu method, and Pradhan algorithm with Thaichote data over Prince of Songkla University, Songkhla Province, stated that Pradhan algorithm preserves the spectral characteristics and enhances the texture properties whereas increasing noise based on RMSE value.

4.3.4 Effect on classification accuracy (ECA)

Effect on classification accuracy is an alternative approach for image quality evaluation based on accuracy assessment (overall accuracy and kappa hat

coefficient) of classified land use map from the selected pan-sharpening method. Unsupervised classification with ISODATA clustering algorithm was herein firstly applied to extract land use types from all pan-sharpened data for each application. Then, all classified land use data from each pan-sharpening method for each application were access accuracy (overall accuracy and kappa hat coefficient) using sample points from the existing land use data of LDD in 2011 with field survey in 2013.

In this study, 10 spectral classes were generated under ISODATA clustering using ERDAS Imagine software with the convergence threshold value of 0.99 or the maximum iteration of 60. After that, all spectral classes were assigned to be thematic classes (land use types) according to land use data of LDD in 2011 and field survey in 2013. Numbers and the extracted land use classes in each testing area for each application were summarized as shown in Table 4.33. The results of accuracy assessment (overall accuracy and kappa coefficient of agreement – Kappa hat) for land use extraction from the selected pan-sharpening methods in each testing area of each application were summarized as shown in Tables 4.34 - 4.39. Detail of accuracy assessment which include overall accuracy, producer accuracy, user accuracy and Kappa hat and distribution of sample point were presented in Appendix D. Meanwhile, the reference map from LDD in 2011 was compared with the highest and lowest accurate classified map from the selected pan-sharpening method in each testing area of each application displayed in Figures 4.21 - 4.23.

Table 4.33 Numbers of land use classes in each testing area for each application.

Testing area	No. of spectral classes	No. of thematic classes	Land use type
Agriculture area 1 (A1)	10	4	Urban and built-up areas Field crops Perennial trees and orchard Water bodies
Agriculture area 2 (A2)	10	4	Field crops Perennial trees and orchard Horticulture Water bodies
Forest area 1 (F1)	10	4	Field crops Perennial trees and orchard Forest land Water bodies
Forest area 2 (F2)	10	3	Field crops Perennial trees and orchard Forest land
Urban area 1 (U1)	10	3	Urban and built-up areas Water bodies Miscellaneous land
Urban area 2 (U2)	10	4	Urban and built-up areas Commercial land Water bodies Miscellaneous land

Table 4.34 Results of accuracy assessment and its normalized score for agriculture testing area 1 (A1).

Method	Overall accuracy	Kappa hat	Total Score	Normalized Score (0-10)
BT	38.78	10.39	49.17	2
MT	39.80	12.31	52.11	3
PCA	39.80	11.66	51.46	3
IHST	38.27	0.22	38.49	2
MIHST	44.90	9.52	54.42	3
HPF	39.80	5.16	44.96	2
WT	44.90	8.99	53.89	3
EF	43.88	8.61	52.49	3
GS	39.80	7.15	46.95	2

Table 4.35 Results of accuracy assessment and its normalized score for agriculture testing area 2 (A2).

Method	Overall accuracy	Kappa hat	Total Score	Normalized Score (0-10)
BT	69.90	38.96	108.86	5
MT	67.86	32.15	100.01	5
PCA	68.37	35.10	103.47	5
IHST	66.84	27.88	94.72	5
MIHST	65.31	35.18	100.49	5
HPF	69.39	34.56	103.95	5
WT	64.80	26.40	91.20	5
EF	67.35	27.68	95.03	5
GS	67.86	33.95	101.81	5

Table 4.36 Results of accuracy assessment and its normalized score for forestry testing area 1 (F1).

Method	Overall accuracy	Kappa hat	Total Score	Normalized Score (0-10)
BT	51.53	21.43	72.96	4
MT	54.59	27.99	82.58	4
PCA	47.45	14.48	61.93	3
IHST	50.00	18.08	68.08	3
MIHST	51.53	19.42	70.95	4
HPF	53.06	21.29	74.35	4
WT	54.59	23.98	78.57	4
EF	51.53	20.40	71.93	4
GS	51.02	19.48	70.50	4

Table 4.37 Results of accuracy assessment and its normalized score for forestry testing area 2 (F2).

Method	Overall accuracy	Kappa hat	Total Score	Normalized Score (0-10)
BT	72.96	31.08	104.04	5
MT	65.31	17.30	82.61	4
PCA	65.31	17.30	82.61	4
IHST	68.37	27.23	95.60	5
MIHST	67.35	22.55	89.90	4
HPF	69.39	30.94	100.33	5
WT	72.45	39.26	111.71	6
EF	67.86	27.50	95.36	5
GS	66.84	28.20	95.04	5

Table 4.38 Results of accuracy assessment and its normalized score for urban testing area 1 (U1).

Method	Overall accuracy	Kappa hat	Total Score	Normalized Score (0-10)
BT	70.92	29.79	100.71	5
MT	79.08	38.37	117.45	6
PCA	56.12	19.82	75.94	4
IHST	25.00	7.98	32.98	2
MIHST	72.45	27.61	100.06	5
HPF	61.73	26.71	88.44	4
WT	64.29	23.35	87.64	4
EF	85.20	42.98	128.18	6
GS	63.27	26.91	90.18	5

Table 4.39 Results of accuracy assessment and its normalized score for urban testing area 2 (U2).

Method	Overall accuracy	Kappa hat	Total Score	Normalized Score (0-10)
BT	69.39	0.2258	91.97	5
MT	70.41	0.2812	98.53	5
PCA	59.69	0.1838	78.07	4
IHST	67.35	0.2079	88.14	4
MIHST	40.31	0.1006	50.37	3
HPF	54.08	0.1661	70.69	4
WT	68.37	0.2470	93.07	5
EF	67.35	0.2401	91.36	5
GS	62.24	0.2266	84.90	4

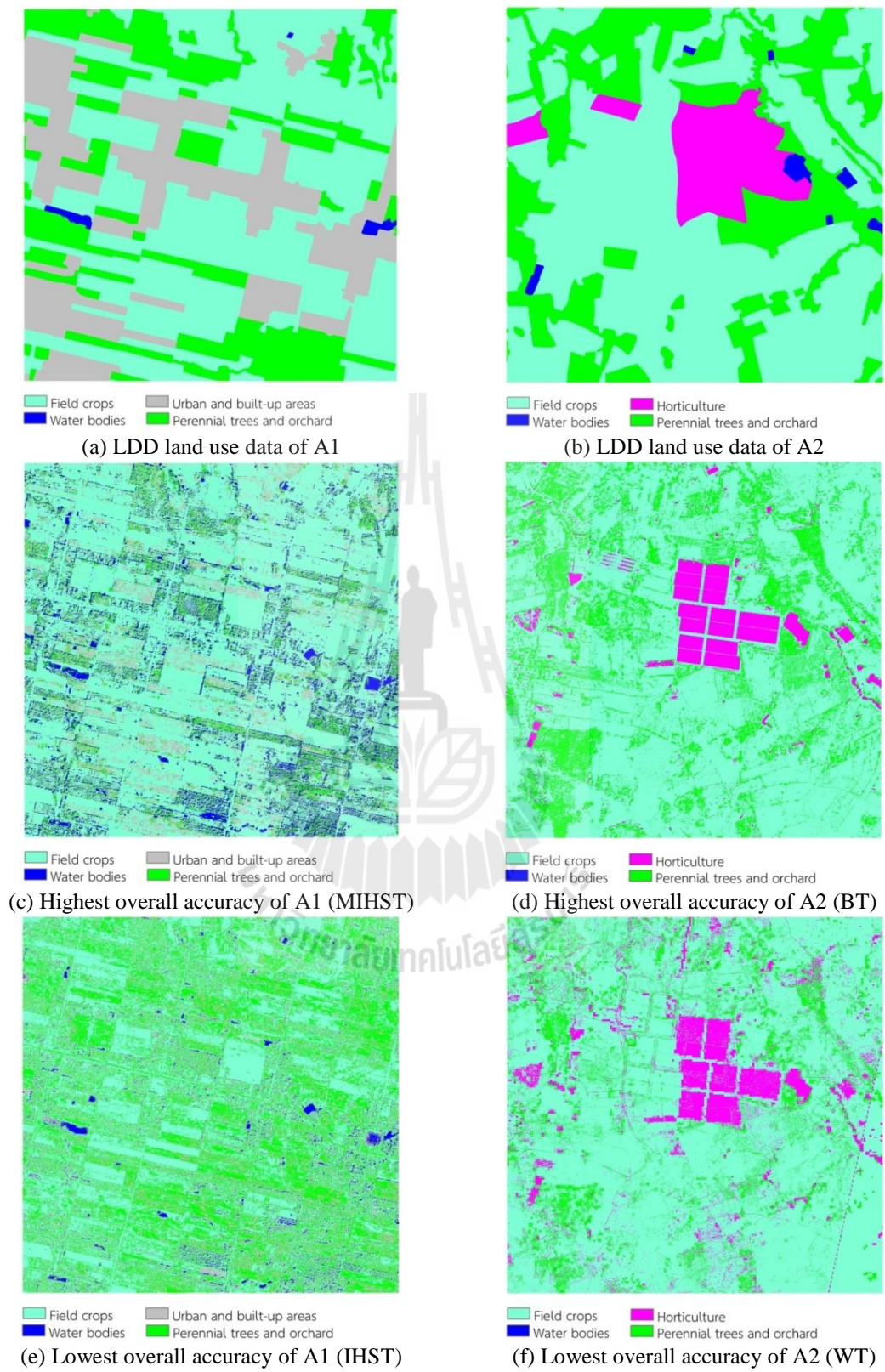


Figure 4.21 Reference and classified land use maps for testing area A1 and A2

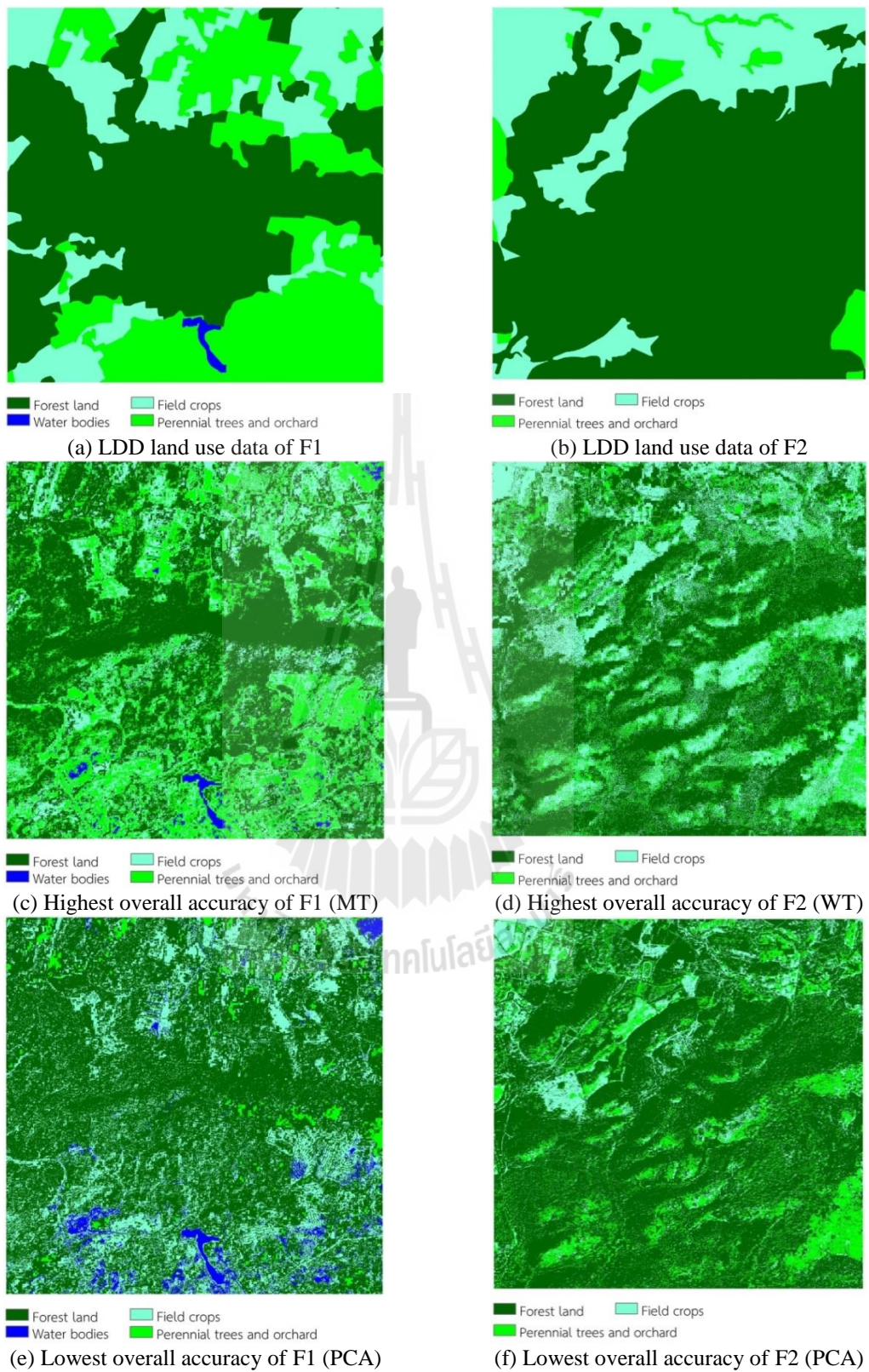


Figure 4.22 Reference and classified land use maps for testing area F1 and F2.

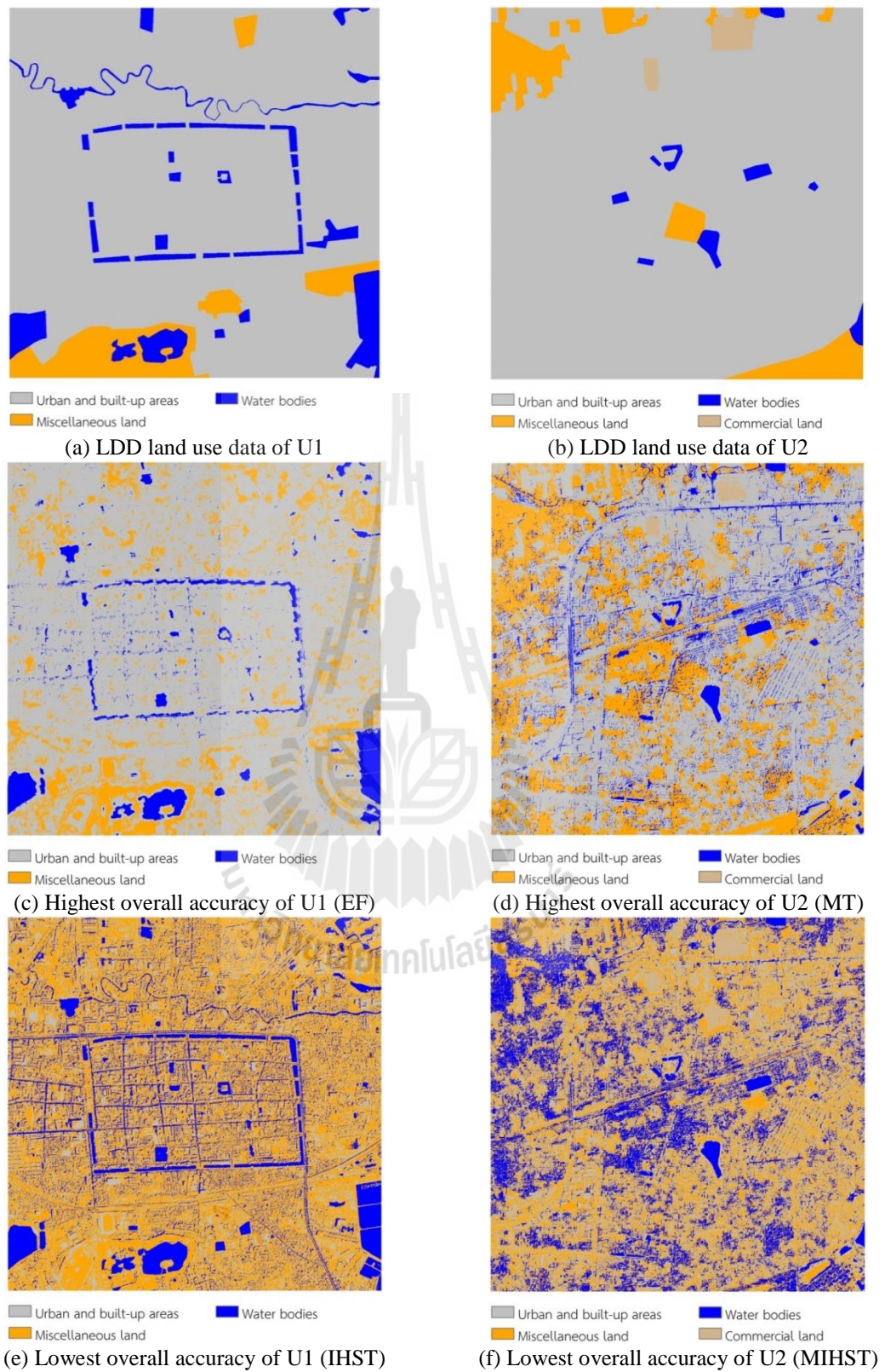


Figure 4.23 Reference and classified land use maps for testing area U1 and U2.

Referring to Tables 4.34 - 4.39, total score of accuracy assessment (addition of overall accuracy and kappa hat coefficient) among the selected pan-sharpening methods were quite different. However, normalized scores from various pan-sharpening method were likely similar.

For agriculture application, the pan-sharpening method, which provided the highest accuracy as total score for land use extraction by ISODATA clustering in testing area 1, was MIHST with value of 54.42 while IHST provided the lowest accuracy with total score of 38.49. However, the normalized score among pan-sharpening methods varied between 2 and 3. These findings showed that the most appropriate Thaichote pan-sharpening method for land use extraction of agriculture application in testing area 1 may be included EF, MIHST, MT, PCA, and WT (Table 4.34). Meanwhile, the pan-sharpening method, which provided the highest accuracy as total score in testing area 2, was BT with value of 108.86 while WT provided the lowest total score accuracy of 91.20. However, the normalized score among pan-sharpening methods were indifferent. These findings also inferred that all selected pan-sharpening methods were appropriate for land use extraction of agriculture testing area 2 (Table 4.35). Therefore, it might be concluded that the possibly appropriate Thaichote pan-sharpening methods for land use extraction in agriculture application may be included MT, PCA, MIHST, WT, and EF.

For forestry application, the pan-sharpening method, which provided the highest accuracy as total score for land use extraction in testing area 1, was MT with value of 82.58 while PCA provided the lowest total score of accuracy with value of 61.93. The normalized score among pan-sharpening methods varied between 3 and 4. These findings implied that most of pan-sharpening methods for land use extraction in

testing area 1 were appropriate except IHST and PCA (see Table 4.36). Meanwhile, the pan-sharpening method, which provided the highest total score of accuracy in testing area 2, was WT with value of 111.71 while MT and PCA provided the lowest accurate total score with value of 82.61. The normalized score among pan-sharpening methods varied between 4 and 6. These results implied that some of pan-sharpening methods for land use extraction were appropriate except MIHST, MT, and PCA (Table 4.37). The WT was the most appropriate pan-sharpening method. Consequently, it might be here concluded that the possibly appropriate Thaichote pan-sharpening methods for land use extraction in forestry application might include BT, HPF, WT, EF, and GS.

For urban application, the pan-sharpening method, which provided the highest accuracy as total score for land use extraction by ISODATA clustering in testing area 1, was EF with value of 128.18 while IHST provided the lowest accurate total score with value of 32.98. The range of the total score was 95.20 showed a variation of accuracy for land use extraction in testing area 1 (U1). Similarly, the normalized score among pan-sharpening methods varied between 2 and 6. These results implied that the appropriate pan-sharpening method for land use extraction in testing area 1 for urban application may be included BT, EF, GS, MIHST, and MT (Table 4.38). Meanwhile, the pan-sharpening method, which provided the highest accurate total score in testing area 2, was MT with value of 98.53 while MIHST provided the lowest accurate total score (50.37). The normalized score among pan-sharpening methods varied between 3 and 5. These results imply that the appropriate pan-sharpening methods for land use extraction in testing area 2 included BT, EF, MT, and WT (Table 4.tables9). Consequently, it may be come to the conclusion that

the possibly appropriate Thaichote pan-sharpening methods for land use extraction in urban application include BT, MT, and EF.

In summary, the study come to conclude that the most appropriate method for producing the Thaichote pan-sharpened image for land use extraction in three applications areas (agriculture, forest, and urban) was EF. This conclusion was based on the common pan-sharpening method founded in six different testing areas or without the consideration of heterogeneity of testing areas.

4.4 Optimum pan-sharpening method by self-evaluation

The quantitative measurement of Thaichote pan-sharpened image quality by four criteria included (1) visual image analysis (VIA), (2) edge detection analysis (EDA) (3) spectral quality indices (QI), and (4) effect on classification accuracy (ECA) were here combined using SAW method with equal weight to identify an optimum pan-sharpening method by self-evaluation for each application (agriculture, forestry, and urban).

4.4.1 Optimum pan-sharpening method for agriculture application

Four normalized score from each criterion of each pan-sharpening method in two testing areas (A1 and A2) in Section 4.3 was combined with equal weight as total score and its ranking as shown in Tables 4.40 - 4.41. Meanwhile the distribution of normalized score in each criterion with total score of each pan-sharpening method was compared as shown in Figures 4.24 - 4.25.

This procedure based on the concept of weighted average; it computes total score for each pan-sharpening method by multiplying the normalized score with equal weight in any indicators (VIA, EDA, QI, and ECA) and summing the products of all image quality indicators as a total score. The pan-sharpening method with the highest total score is the most appropriate method for applying to the specific remote sensing application.

As results, it was found that an optimum pan-sharpening method of Thaichote data for agriculture application in both testing areas (A1 and A2) was HPF. However, if ERDAS Imagine software is unavailable for pan-sharpening operation, GS method which was available in ENVI software can be chosen as an optimum pan-sharpening method for agriculture application. In addition, it is evident that WT method was inappropriate for Thaichote pan-sharpened image creation for agriculture application in both testing areas.

Table 4.40 Normalized score and total score by SAW with equal weight and its rank of agriculture testing area 1 (A1).

Method	Normalized score				Total score	Ranking
	VIA	EDA	QI	ECA		
BT	8	6	6	2	22	6
MT	3	5	4	3	15	8
PCA	10	5	8	3	26	4
IHST	8	7	2	2	19	7
MIHST	9	6	9	3	27	3
HPF	10	8	9	2	29	1
WT	5	0	3	3	11	9
EF	7	6	9	3	25	5
GS	10	7	9	2	28	2

Table 4.41 Normalized score and total score by SAW with equal weight and its rank of agriculture testing area 2 (A2).

Method	Normalized score				Total score	Ranking
	VIA	EDA	QI	ECA		
BT	8	6	6	5	25	6
MT	3	5	3	5	16	8
PCA	9	5	7	5	26	5
IHST	8	8	2	5	23	7
MIHST	9	6	9	5	29	3
HPF	9	8	9	5	31	1
WT	5	0	3	5	13	9
EF	8	6	9	5	28	4
GS	10	7	9	5	31	1

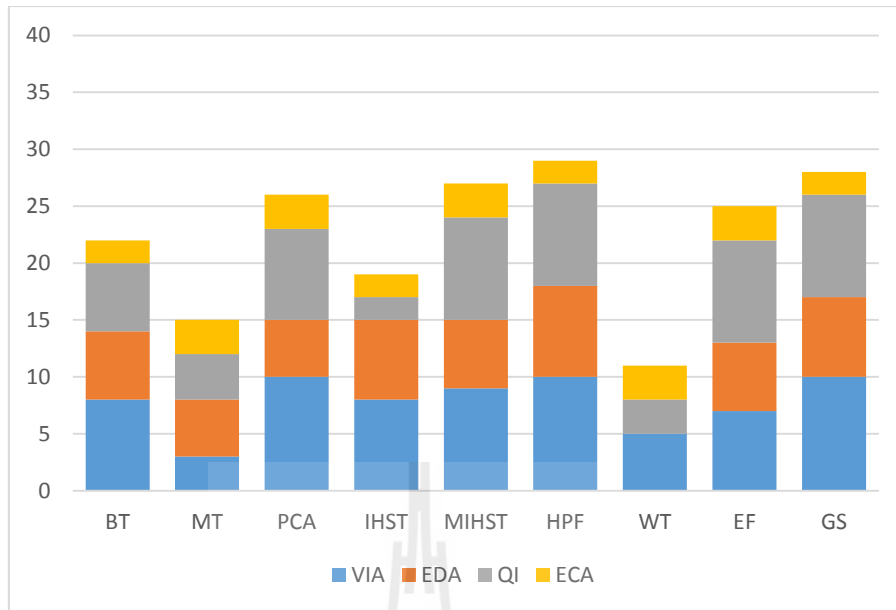


Figure 4.24 Distribution of normalized score in each criterion and total score of each pan-sharpening method for agriculture application in testing area 1 (A1).

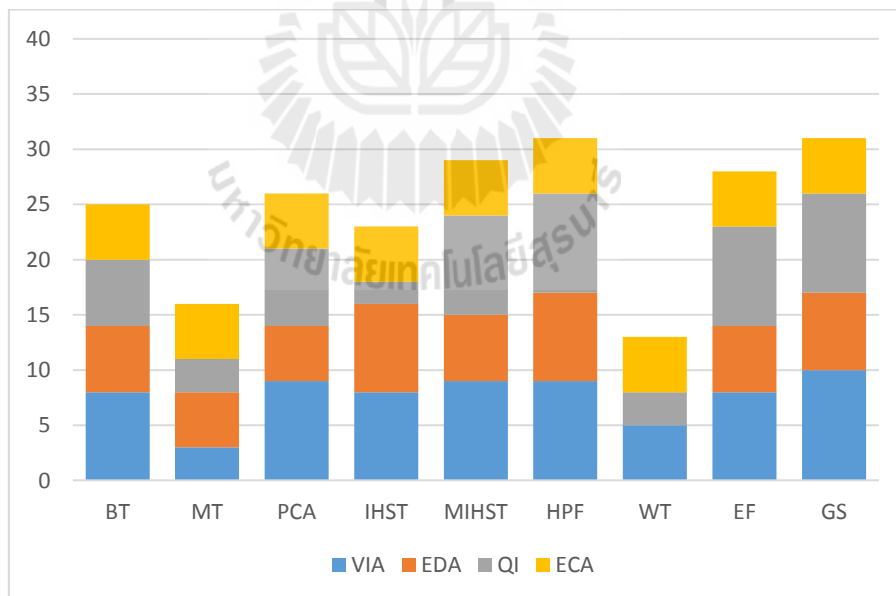


Figure 4.25 Distribution of normalized score in each criterion and total score of each pan-sharpening method for agriculture application in testing area 2 (A2).

4.4.2 Optimum pan-sharpening method for forestry application

Four normalized score from each criterion of each pan-sharpening method in two testing areas (F1 and F2) in Section 4.3 was combined with equal weight as total score and ranking in Tables 4.42 - 4.43. Meanwhile, the distribution of normalized score in each criterion with total score of each pan-sharpening method was compared as shown in Figures 4.26 - 4.27.

As results, it was found that an optimum pan-sharpening method of Thaichote data for forestry application in testing area 1 (F1) was HPF while GS was an optimum pan-sharpening method in testing area 2 (F2). However, when considering the combined total score of both testing areas, the optimum pan-sharpening methods of Thaichote data for forestry application were HPF and GS methods. This finding may be true only one method when availability of image processing software (ERDAS Imagine and ENVI) was considered. Furthermore, it is evident that WT method was inappropriate for Thaichote pan-sharpened image creation for forestry application in both testing areas.

Table 4.42 Normalized score and total score by SAW with equal weight and its rank of forestry testing area 1 (F1).

Method	Normalized score				Total score	Ranking
	VIA	EDA	QI	ECA		
BT	9	6	6	4	25	4
MT	6	5	3	4	18	7
PCA	7	5	7	3	22	6
IHST	6	7	2	3	18	7
MIHST	8	6	9	4	27	3
HPF	9	8	8	4	29	2
WT	3	0	2	4	9	9
EF	7	6	8	4	25	4
GS	10	7	9	4	30	1

Table 4.43 Normalized score and total score by SAW with equal weight and its rank of forestry testing area 2 (F2).

Method	Normalized score				Total score	Ranking
	VIA	EDA	QI	ECA		
BT	9	6	6	5	26	3
MT	5	5	3	4	17	8
PCA	7	5	7	4	23	6
IHST	4	7	2	5	18	7
MIHST	6	6	9	4	25	4
HPF	9	8	9	5	31	1
WT	3	0	2	6	11	9
EF	6	6	8	5	25	4
GS	9	7	9	5	30	2

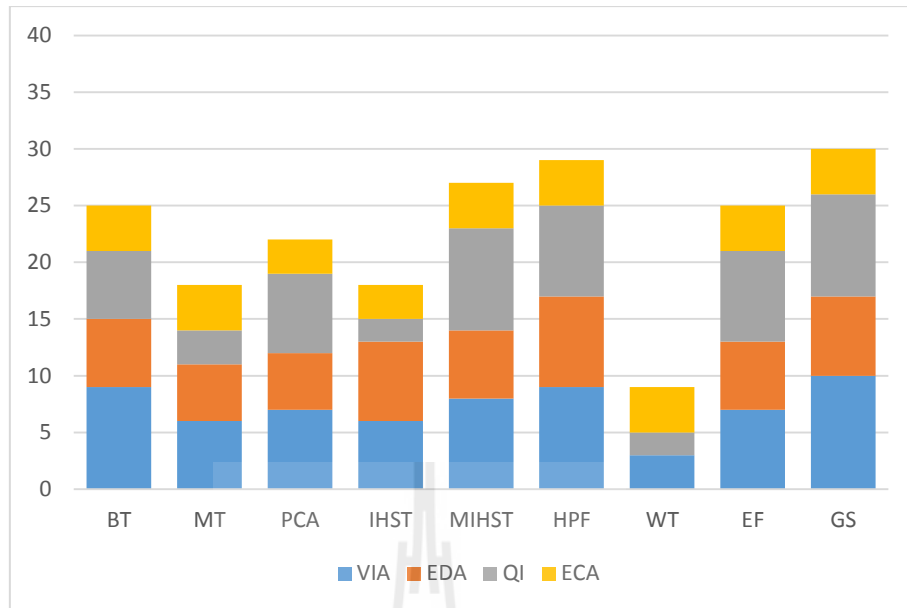


Figure 4.26 Distribution of normalized score in each criterion and total score of each pan-sharpening method for forestry application in testing area 1 (F1).

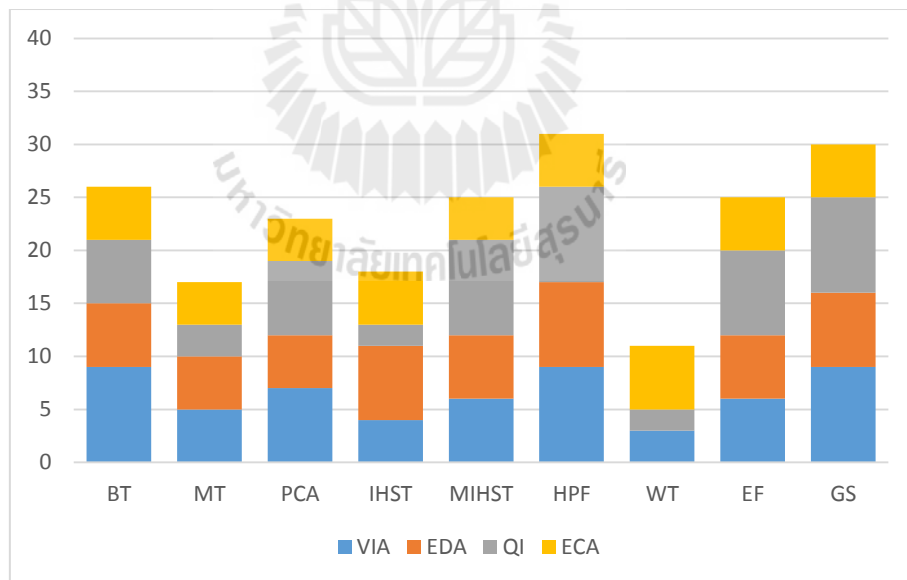


Figure 4.27 Distribution of normalized score in each criterion and total score of each pan-sharpening method for forestry application in testing area 2 (F2).

4.4.3 Optimum pan-sharpening method for urban application

Four normalized score from each criterion of each pan-sharpening method in two testing areas (U1 and U2) in Section 4.3 was combined with equal weight as total score and ranking as presented in Tables 4.44 - 4.45. Meanwhile the distribution of normalized score in each criterion with total score of each pan-sharpening method was compared as shown in Figures 4.28 - 4.29.

As results, it revealed that an optimum Thaichote pan-sharpening method for urban application in testing area 1 (U1) were BT and GS, while the HPF and GS were the optimum Thaichote pan-sharpening methods in testing area 2 (U2). Furthermore, when both testing areas (U1 and U2) are considering, GS was an optimum Thaichote pan-sharpening method for urban application. However, when considering the software availability, BT and HPF methods can be applied as an optimum pan-sharpening method for Thaichote data in urban application. In addition, it is clear that WT method was inappropriate for Thaichote pan-sharpening creation for urban application in both testing areas.

Table 4.44 Normalized score and total score by SAW with equal weight and its rank of urban testing area 1 (U1).

Method	Normalized score				Total score	Ranking
	VIA	EDA	QI	ECA		
BT	8	8	7	5	28	1
MT	3	7	3	6	19	6
PCA	5	0	7	4	16	8
IHST	6	7	2	2	17	7
MIHST	6	7	9	5	27	3
HPF	7	8	8	4	27	3
WT	3	0	2	4	9	9
EF	5	7	9	6	27	3
GS	8	8	7	5	28	1

Table 4.45 Normalized score and total score by SAW with equal weight and its rank of urban testing area 2 (U2).

Method	Normalized score				Total score	Ranking
	VIA	EDA	QI	ECA		
BT	8	8	7	5	28	3
MT	5	7	3	5	20	6
PCA	4	0	7	4	15	8
IHST	6	7	2	4	19	7
MIHST	8	7	9	3	27	4
HPF	9	8	8	4	29	1
WT	3	0	2	5	10	9
EF	6	7	9	5	27	4
GS	10	8	7	4	29	1

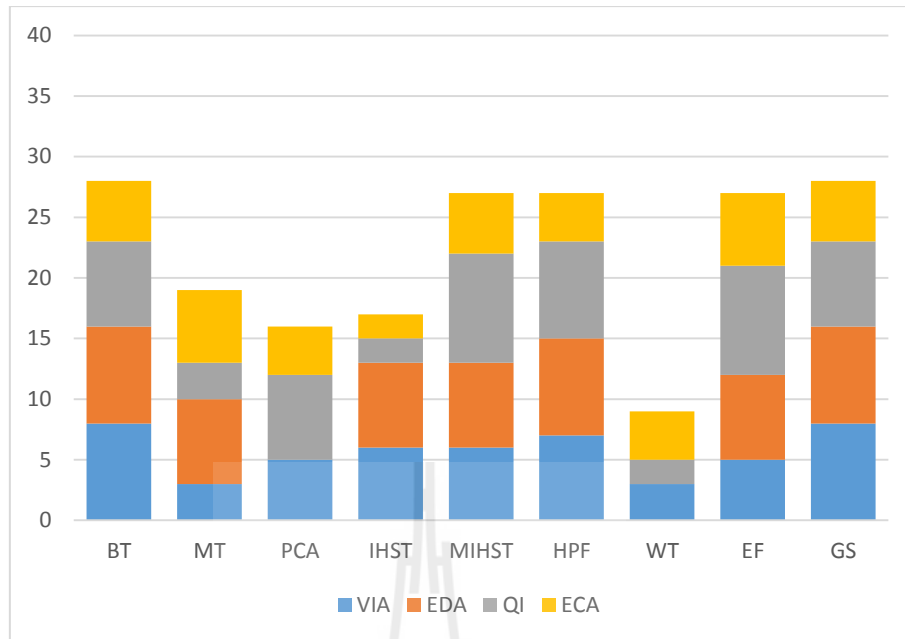


Figure 4.28 Distribution of normalized score in each criterion and total score of each pan-sharpening method for urban application in testing area 1 (U1).

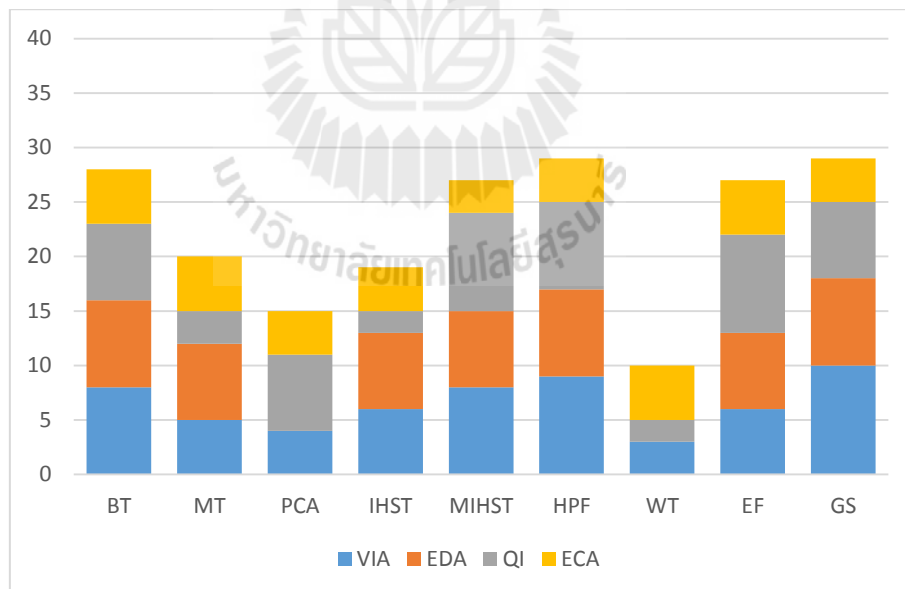


Figure 4.29 Distribution of normalized score in each criterion and total score of each pan-sharpening method for urban application in testing area 2 (U2).

4.4.4 Optimum pan-sharpening method for three applications

An optimum pan-sharpening method for Thaichote data in three applications (agriculture, forestry, and urban) was here considered based on the summation of three total score as overall score (Table 4.46). It was found that the optimum pan-sharpening methods for Thaichote data in three applications were HPF and GS. This conclusion may be true only one method if availability of software was considered. In addition, it can be observed that WT method was inappropriate for Thaichote pan-sharpening creation in three applications.

Table 4.46 Total and overall scores for three applications (agriculture, forestry and urban) based on self-evaluation.

Method	Total score						Overall score
	Agriculture		Forestry		Urban		
	A1	A2	F1	F2	U1	U2	
BT	22	25	25	26	28	28	154
MT	15	16	18	17	19	20	105
PCA	26	26	22	23	16	15	128
IHST	19	23	18	18	17	19	114
MIHST	27	29	27	25	27	27	162
HPF	29	31	29	31	27	29	176
WT	11	13	9	11	9	10	63
EF	25	28	25	25	27	27	157
GS	28	31	30	30	28	29	176

4.5 Optimum pan-sharpening method based on users' requirement

The quantitative measurement of Thaichote pan-sharpened image quality using four criteria (VIA, EDA, QI, and ECA) were combined by means of SAW method with specific weight according to the requirement of three expert groups (agriculture, forestry, and urban) for each criterion. The weight for each criterion given by the experts for SAW operation was summarized as shown in Table 4.47.

Table 4.47 Weight for each image quality criterion given by each expert group.

Application	Expert	VIA	EDA	QI	ECA
Agriculture	1	80.00	10.00	0.00	10.00
	2	50.00	20.00	10.00	20.00
	3	40.00	10.00	40.00	10.00
	4	80.00	10.00	10.00	0.00
	5	50.00	20.00	20.00	10.00
Average (%)		60.00	14.00	16.00	10.00
Weight		0.60	0.14	0.16	0.10
Forestry	1	37.50	12.50	12.50	37.50
	2	95.00	2.00	2.00	1.00
	3	90.00	3.00	5.00	2.00
	4	50.00	25.00	25.00	0.00
	5	60.00	10.00	10.00	20.00
Average (%)		66.50	10.50	10.90	12.10
Weight		0.66	0.11	0.11	0.12
Urban	1	100.00	0.00	0.00	0.00
	2	100.00	0.00	0.00	0.00
	3	60.00	10.00	20.00	10.00
	4	30.00	10.00	60.00	0.00
	5	50.00	10.00	10.00	30.00
Average (%)		68.00	6.00	18.00	8.00
Weight		0.68	0.06	0.18	0.08

4.5.1 Optimum pan-sharpening method for agriculture application

Four normalized score from each criterion of each pan-sharpening method in two testing areas (A1 and A2), as shown in Tables 4.40 - 4.41, was multiplied by the weight from agricultural experts to compute a total score and ranking as shown in Tables 4.48 - 4.49. Meanwhile distribution of each criterion score and total score of each pan-sharpening method was compared as shown in Figures 4.30 - 4.31. Both figures showed the proportion of users' requirement for each criterion. It was found that VIA was the most preference among agricultural experts. This implied that the utilization of Thaichote pan-sharpening data relied on visual interpretation.

As results, the study comes to the conclusion that an optimum Thaichote pan-sharpening method in agriculture application in testing areas 1 (A1) was HPF (8.76). At the same time, GS method was an optimum method in testing area 2 (A2) with total score of 8.92. In addition, it is clear that MT method was inappropriate for Thaichote image pan-sharpening creation in agriculture application in both testing areas as it yields the lowest total score (3.44 and 3.48). Furthermore, when both testing areas (A1 and A2) are concurrently considering, GS was an optimum Thaichote pan-sharpening method for urban application. However, HPF method is chosen as an optimum pan-sharpening method for Thaichote data in urban application when ENVI software was unavailable.

Table 4.48 Criterion score and total score using SAW with users' weight and its rank of agriculture testing area 1 (A1).

Method	Criterion score				Total score	Ranking
	VIA	EDA	QI	ECA		
BT	4.80	0.84	0.96	0.20	6.80	5
MT	1.80	0.70	0.64	0.30	3.44	9
PCA	6.00	0.70	1.28	0.30	8.28	3
IHST	4.80	0.98	0.32	0.20	6.30	7
MIHST	5.40	0.84	1.44	0.30	7.98	4
HPF	6.00	1.12	1.44	0.20	8.76	1
WT	3.00	0.00	0.48	0.30	3.78	8
EF	4.20	0.84	1.44	0.30	6.78	6
GS	6.00	0.98	1.44	0.20	8.62	2

Table 4.49 Criterion score and total score using SAW with users' weight and its rank of agriculture testing area 2 (A2).

Method	Criterion score				Total score	Ranking
	VIA	EDA	QI	ECA		
BT	4.80	0.84	0.96	0.50	7.10	6
MT	1.80	0.70	0.48	0.50	3.48	9
PCA	5.40	0.70	1.12	0.50	7.72	4
IHST	4.80	1.12	0.32	0.50	6.74	7
MIHST	5.40	0.84	1.44	0.50	8.18	3
HPF	5.40	1.12	1.44	0.50	8.46	2
WT	3.00	0.00	0.48	0.50	3.98	8
EF	4.80	0.84	1.44	0.50	7.58	5
GS	6.00	0.98	1.44	0.50	8.92	1

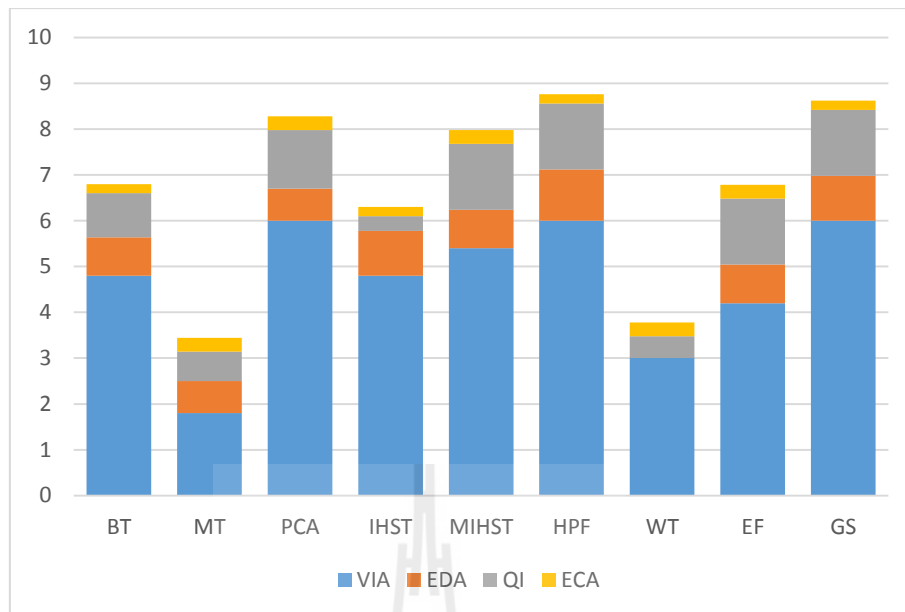


Figure 4.30 Distribution of criterion and total scores by users' requirement of each pan-sharpening method for agriculture testing area 1 (A1).

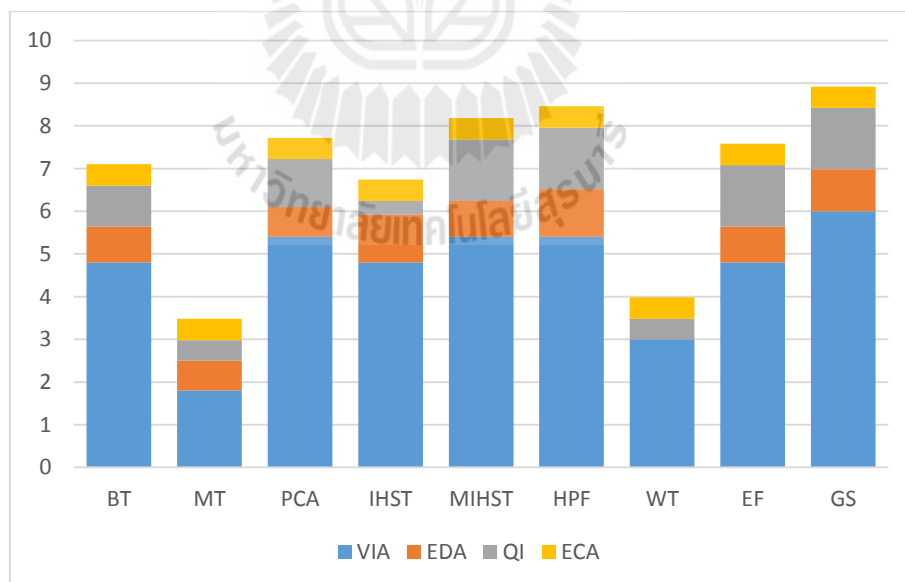


Figure 4.31 Distribution of criterion and total scores by users' requirement of each pan-sharpening method for agriculture testing area 2 (A2).

4.5.2 Optimum pan-sharpening method for forestry application

Four normalized dataset from each criterion of each pan-sharpening method in two testing areas (F1 and F2), shown in Tables 4.42 - 4.43, was multiplied by the weight from forestry experts to compute a total score and ranking as shown in Tables 4.50 - 4.51. Whilst distribution of each criterion score and total score of each pan-sharpening method was compared as shown in Figures 4.32 - 4.33. Both figures showed the proportion of users' requirement for each criterion. Similar to agricultural application, it was disclosed that VIA approach was the most preference among forestry experts. This implied that visual interpretation of Thaichote pan-sharpening data are always applied in forestry application.

As results, the study come to conclude that an optimum pan-sharpening method for Thaichote data for forestry application in testing area 1 (F1) was GS with total score of 8.84. Meanwhile HPF with total score of 8.41 was an optimum pan-sharpening method for forestry application in testing area 2 (F2). In addition, it revealed that WT method was inappropriate for applying to the forestry application in both testing areas as it provided the lowest total score (2.68 and 2.92, respectively). Furthermore, when both testing areas (F1 and F2) were concurrently considered, GS method was an optimum Thaichote pan-sharpening method for forestry application. However, the HPF method is chosen to provide an optimum pan-sharpening method for Thaichote data when only ERDAS Imagine software was available.

Table 4.50 Criterion score and total score using SAW with users' weight and its rank of forestry testing area 1 (F1).

Method	Criterion score				Total score	Ranking
	VIA	EDA	QI	ECA		
BT	5.94	0.66	0.66	0.48	7.74	3
MT	3.96	0.55	0.33	0.48	5.32	7
PCA	4.62	0.55	0.77	0.36	6.30	6
IHST	3.96	0.77	0.22	0.36	5.31	7
MIHST	5.28	0.66	0.99	0.48	7.41	4
HPF	5.94	0.88	0.88	0.48	8.18	2
WT	1.98	0.00	0.22	0.48	2.68	9
EF	4.62	0.66	0.88	0.48	6.64	5
GS	6.60	0.77	0.99	0.48	8.84	1

Table 4.51 Criterion score and total score using SAW with users' weight and its rank of forestry testing area 2 (F2).

Method	Criterion score				Total score	Ranking
	VIA	EDA	QI	ECA		
BT	5.94	0.66	0.66	0.60	7.86	3
MT	3.30	0.55	0.33	0.48	4.66	7
PCA	4.62	0.55	0.77	0.48	6.42	4
IHST	2.64	0.77	0.22	0.60	4.23	8
MIHST	3.96	0.66	0.99	0.48	6.09	5
HPF	5.94	0.88	0.99	0.60	8.41	1
WT	1.98	0.00	0.22	0.72	2.92	9
EF	3.96	0.66	0.88	0.60	6.10	5
GS	5.94	0.77	0.99	0.60	8.30	2

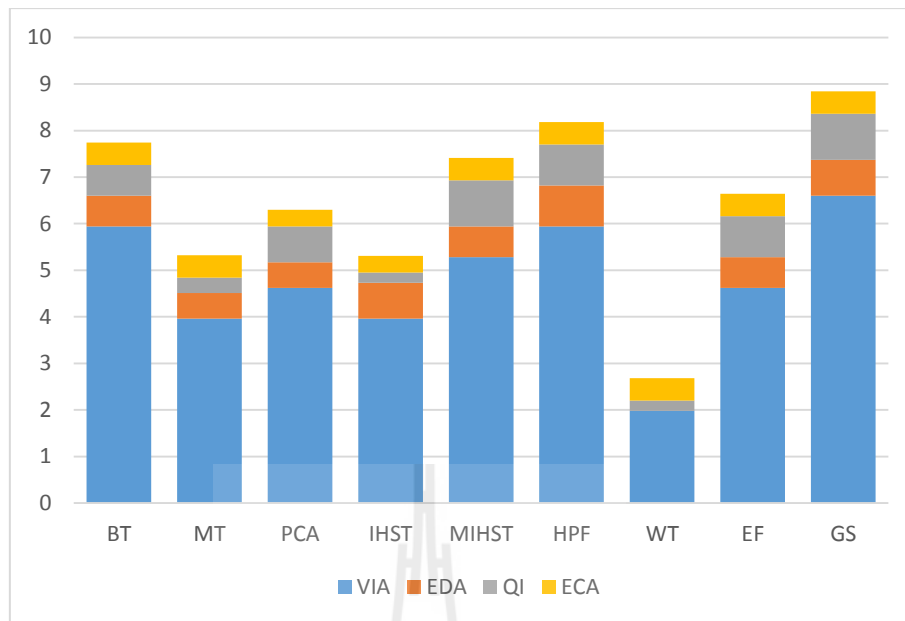


Figure 4.32 Distribution of criterion and total scores by users' requirement of each pan-sharpening method for forestry testing area 1 (F1).

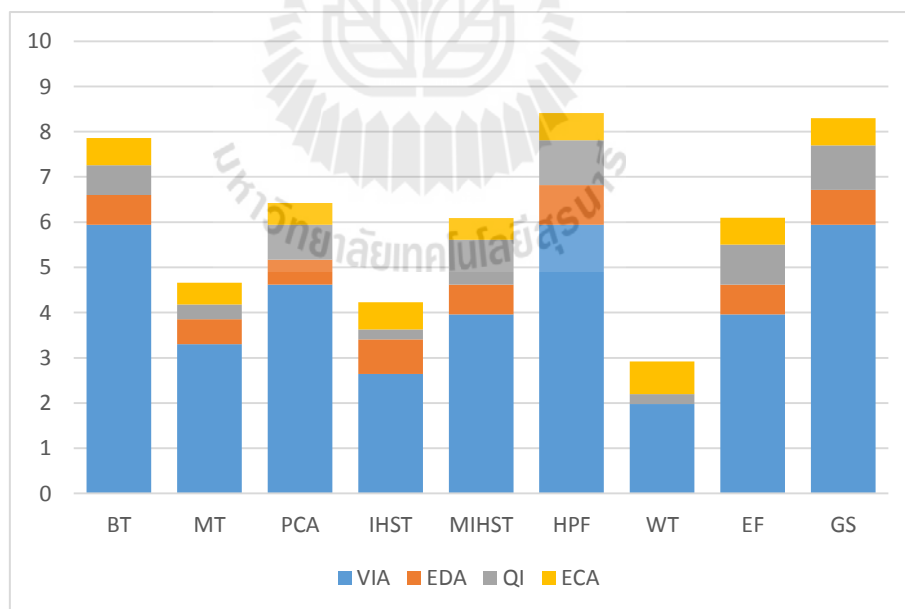


Figure 4.33 Distribution of criterion and total scores by users' requirement of each pan-sharpening method for forestry testing area 2 (F2).

4.5.3 Optimum pan-sharpening method for urban application

Similar to agriculture and the forestry applications, four normalized scores from each criterion of each pan-sharpening method in two testing areas (shown in Tables 4.44 - 4.45) were multiplied by the weight from urban experts to calculate a total score and ranking as shown in Tables 4.52 - 4.53. Meanwhile distribution of each criterion score and total score of each pan-sharpening method was compared as displayed in Figures 4.34 - 4.35. Both figures showed the preferable use of Thaichote pan-sharpened product using visual image interpretation with reference to agricultural and forestry experts.

As results, it revealed that the optimum pan-sharpening methods for Thaichote data in urban application in testing area 1 (U1) were BT and GS with total score of 7.58. Meanwhile GS with total score of 8.86 was an optimum pan-sharpening method for urban testing area 2 (U2). In addition, it is disclosed that WT method was inappropriate for Thaichote pan-sharpening creation in urban application in both testing areas. Furthermore, when both testing areas (U1 and U2) were simultaneously applied, GS method was an optimum Thaichote pan-sharpening method in urban application. However, the BT method is selected to provide an optimum pan-sharpening method for Thaichote data in urban application when the ERDAS Imagine software was available.

Table 4.52 Criterion score and total score using SAW with users' weight and its rank of urban testing area 1 (U1).

Method	Criterion score				Total score	Ranking
	VIA	EDA	QI	ECA		
BT	5.44	0.48	1.26	0.40	7.58	1
MT	2.04	0.42	0.54	0.48	3.48	8
PCA	3.40	0.00	1.26	0.32	4.98	7
IHST	4.08	0.42	0.36	0.16	5.02	6
MIHST	4.08	0.42	1.62	0.40	6.52	4
HPF	4.76	0.48	1.44	0.32	7.00	3
WT	2.04	0.00	0.36	0.32	2.72	9
EF	3.40	0.42	1.62	0.48	5.92	5
GS	5.44	0.48	1.26	0.40	7.58	1

Table 4.53 Criterion score and total score using SAW with users' weight and its rank of urban testing area 2 (U2).

Method	Criterion score				Total score	Ranking
	VIA	EDA	QI	ECA		
BT	5.44	0.48	1.26	0.40	7.58	4
MT	3.40	0.42	0.54	0.40	4.76	7
PCA	2.72	0.00	1.26	0.32	4.30	8
IHST	4.08	0.42	0.36	0.32	5.18	6
MIHST	5.44	0.42	1.62	0.24	7.72	3
HPF	6.12	0.48	1.44	0.32	8.36	2
WT	2.04	0.00	0.36	0.40	2.80	9
EF	4.08	0.42	1.62	0.40	6.52	5
GS	6.80	0.48	1.26	0.32	8.86	1

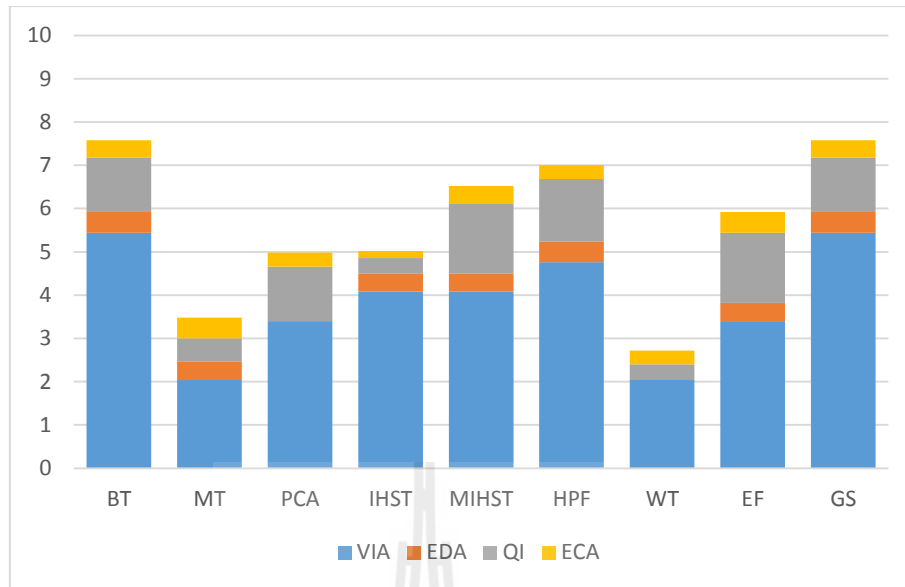


Figure 4.34 Distribution of criterion and total scores by users' requirement of each pan-sharpening method for urban testing area 1 (U1).

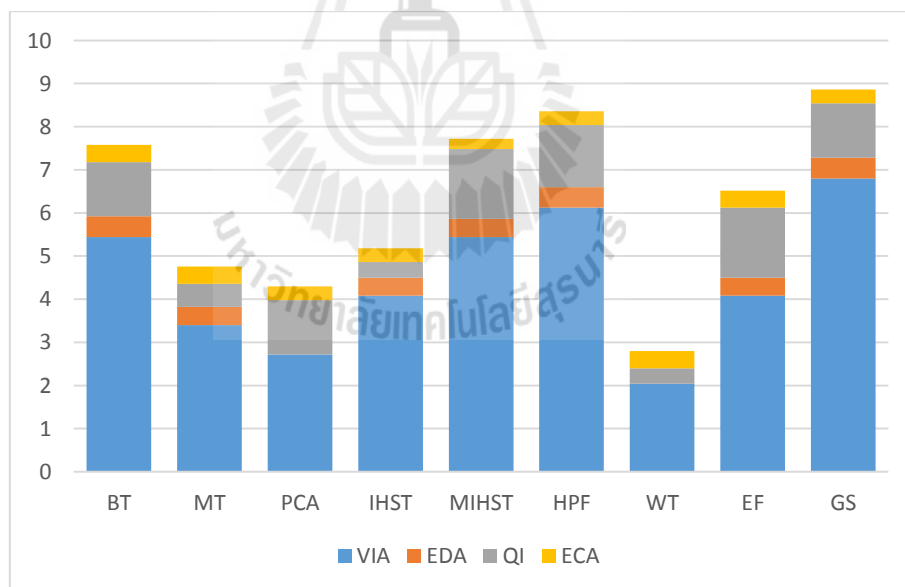


Figure 4.35 Distribution of criterion and total scores by users' requirement of each pan-sharpening method for urban testing area 2 (U2).

4.5.4 Optimum pan-sharpening method for three applications

An optimum pan-sharpening method for three applications (agriculture, forestry, and urban) was utilized based on the summation of three total scores from both testing areas in each application as overall score as shown in Table 4.54. It was found that the optimum pan-sharpening method for Thaichote data in three applications was GS method with overall score of 51.12. However, provided ENVI software was unavailable, the HPF method is selected as an optimum pan-sharpening method for Thaichote data for three applications under ERDAS imagine. In addition, it is clear that WT method was the most inappropriate for Thaichote image pan-sharpening for the three applications.

Table 4.54 Total and overall scores for three applications based on users' requirement.

Method	Total score						Overall score
	Agriculture		Forestry		Urban		
	A1	A2	F1	F2	U1	U2	
BT	6.80	7.10	7.74	7.86	7.58	7.58	44.66
MT	3.44	3.48	5.32	4.66	3.48	4.76	25.14
PCA	8.28	7.72	6.30	6.42	4.98	4.30	38.00
IHST	6.30	6.74	5.31	4.23	5.02	5.18	32.78
MIHST	7.98	8.18	7.41	6.09	6.52	7.72	43.90
HPF	8.76	8.46	8.18	8.41	7.00	8.36	49.17
WT	3.78	3.98	2.68	2.92	2.72	2.80	18.88
EF	6.78	7.58	6.64	6.10	5.92	6.52	39.54
GS	8.62	8.92	8.84	8.30	7.58	8.86	51.12

4.6 Effect of resampling technique on Thaichote image pan-sharpening

In this study, three widely used resampling techniques including nearest neighbor (NN), bilinear interpolation (BIL), and cubic convolution (CUB) were examined the effect of resampling techniques on Thaichote pan-sharpening data in the specific testing area (see Figure 3.7). The two pan-sharpening methods include HPF and WT methods were not applied for this examination as the HPF method do not require resampling technique meanwhile the WT method provide only two options for resampling techniques (NN and BIL). The Universal Image Quality Index (UIQI) was used to measure the spectral variation that obtained from the different resampling techniques by each pan-sharpening method. Theoretically, the range of UIQI value is [-1, 1]. The best achievable value is consequently 1 when the original image and the test image are identical. The comparative result of UIQI values from each resampling technique by each pan-sharpening method was summarized as shown in Table. 4.55 and Figure 4.36.

As a result, it was found that the UIQI value from each resampling technique in each pan-sharpening method was slightly different except the BT method. In addition, most of pan-sharpening method using NN resampling techniques provided the lowest spectral variation except the EF and IHST methods. In fact, the CUB technique was considered as the best resampling technique for EF method; and the BIL technique was regard as the best resampling technique for the IHST method. The average of UIQI values for the NN, BIL and CUB resampling techniques were 0.5676, 0.5452, and 0.5409 respectively. Herewith, it is revealed that the NN resampling technique

was most suitable for the Thaichote image pan-sharpening data. This can be used as a guideline for the image pan-sharpening production using Thaichote data in the future.

Table 4.55 Measurement of spectral variation of the different resampling techniques using UIQI.

Method	UIQI		
	NN	BIL	CUB
BT	0.7167	0.5651	0.5774
EF	0.7786	0.7786	0.7806
GS	0.6485	0.6399	0.6389
IHST	0.2024	0.2434	0.2308
MIHST	0.6842	0.6686	0.6731
MT	0.2857	0.2756	0.2515
PCA	0.6569	0.6449	0.6338
Average	0.5676	0.5452	0.5409

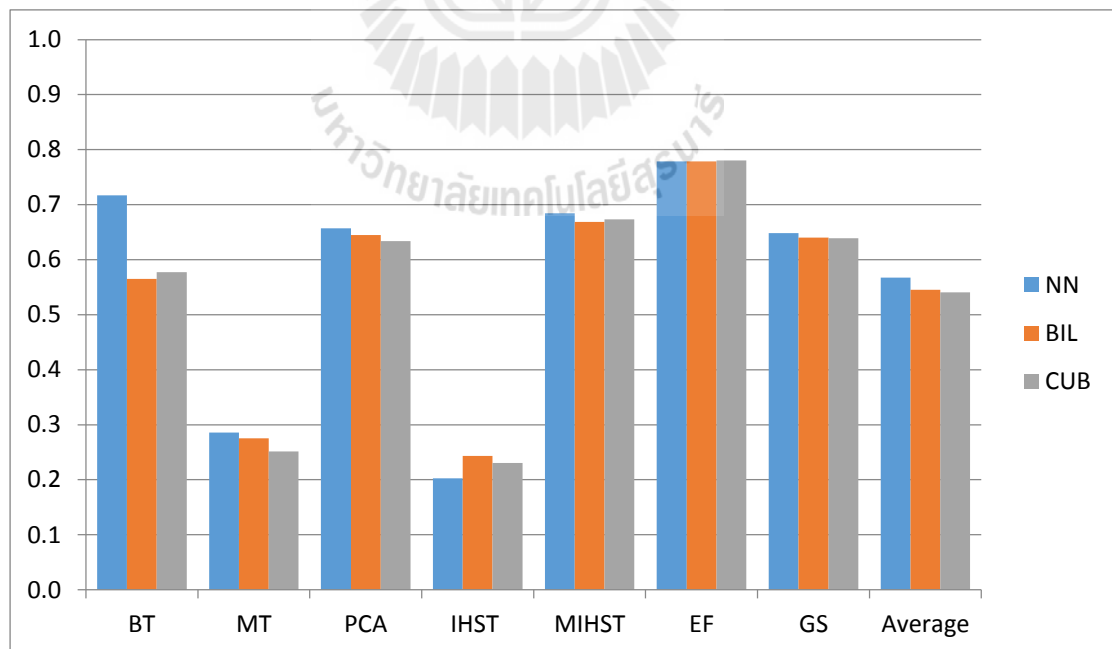


Figure 4.36 Comparison of UIQI values of pan-sharpening methods from different resampling techniques.

CHAPTER V

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Under this chapter, main results and findings according to research objectives included (1) to prepare and measure image qualities of Thaichote pan-sharpened data using VIA, EDA, QI, and ECA for an optimum pan-sharpening method identification, (2) to identify an optimum pan-sharpening method by self-evaluation and the users' requirement with SAW technique and (3) to suggest an optimum pan-sharpening method for agriculture, forestry, and urban applications are here concluded and some recommendations are suggested for future research and development.

5.1 Conclusions

5.1.1 Image quality evaluation based on single criteria

Selected available pan-sharpening methods including (1) BT, (2) MT, (3) PCA, (4) IHST, (5) MIHST, (6) WT, (7) HPF, (8) EF, and (9) GS were here applied for Thaichote pan-sharpening process and all pan-sharpened images were evaluated image quality by four criteria: (1) visual image analysis, (2) edge detection analysis, (3) quality indices, and (4) effect on classification accuracy. The relevant results of image quality evaluation by criterion in each application (agriculture, forestry, and urban) can be concluded as followings.

(1) Visual image analysis. For agriculture application, most of pan-sharpening methods including BT, PCA, IHST, MIHST, HPF, and GS provide the visual interpretability at high level. Herein, the most appropriate method for visual image analysis in agriculture application is GS while the most inappropriate method is MT.

For forestry application, some of pan-sharpening methods: BT, HPF, and GS can provide the visual interpretability at high level. The most appropriate method for visual image analysis in forestry application is GS while WT is the least appropriate method.

In case of urban application, BT and GS provide the high capability for visual interpretability. The most appropriate method for visual image analysis in this application is GS while the least appropriate method is WT.

Consequently, the most appropriate method in producing the Thaichote pan-sharpened image for visual image analysis in three applications (agriculture, forestry, and urban) is GS.

(2) Edge detection analysis. The most appropriate pan-sharpening method for edge detection analysis using Sobel and Laplacian operators in agriculture application is HPF while WT is the least appropriate method.

For forestry application, the most appropriate pan-sharpening method which provides a highly preserved edge structure is HPF while the least appropriate pan-sharpening method is WT. Meanwhile, the most appropriate pan-sharpening method for urban application is GS or HPF and the least appropriate pan-sharpening method is WT.

As a result, the most appropriate method in producing Thaichote pan-sharpened image for edge detecting in three applications (agriculture, forestry, and urban) is HPF.

(3) Quality indices. The most appropriate pan-sharpening method for agriculture application, which provides a minimum spectral deviation, is MIHST. However, the normalized total score for agriculture application shows that the possible appropriate methods for Thaichote pan-sharpening could also include HPF, EF, and GS.

Meanwhile, the most appropriate pan-sharpening method for forestry application is MIHST. Similarly to agriculture application the alternative methods for forestry application may include HPF and GS. For urban application, the most appropriate pan-sharpening method is EF or MIHST.

Consequently, the most appropriate method for producing the Thaichote pan-sharpened image according to quality indices in three applications (agriculture, forestry, and urban) is MIHST.

(4) Effect on classification accuracy. Most of pan-sharpening methods including EF, MIHST, MT, PCA, and WT are appropriate for land use extraction in agriculture application. While most of pan-sharpening methods including BT, HPF, WT, EF, and GS are appropriate for land use extraction in forestry application. At the same time, the appropriate pan-sharpening methods for urban application include BT, EF, and MT.

Subsequently, the most appropriate method for producing the Thaichote pan-sharpened image for land use extraction in three applications (agriculture, forestry, and urban) is EF.

5.1.2 Optimum pan-sharpening method by self-evaluation

The quantitative measurement of image quality of pan-sharpened data by four criteria (VIA, EDA, QI, and ECA) was combined by SAW method with equal weight to identify an optimum pan-sharpening method in each application. An optimum the Thaichote pan-sharpening method for agriculture, forestry, and urban applications can be concluded as followings.

(1) **Agriculture application.** An optimum pan-sharpening method for agriculture application is HPF. However, if ERDAS Imagine software is not available, GS which is available in ENVI software can be selected as an optimum pan-sharpening method.

(2) **Forestry application.** An optimum pan-sharpening method for forestry application can be HPF and GS.

(3) **Urban application.** An optimum pan-sharpening method for urban application is GS. However, when software availability is considered, BT and HPF are optimum pan-sharpening methods.

(4) **For three applications.** An optimum pan-sharpening methods for Thaichote data in three applications (agriculture, forestry, and urban) are HPF and GS. In contrast, WT is the least appropriate method for Thaichote pan-sharpening production in these applications.

5.1.3 Optimum pan-sharpening method based on users' requirement

The quantitative measurement of Thaichote pan-sharpened image quality using four criteria (VIA, EDA, QI, and ECA) are combined by means of SAW method with specific weight for each criterion according to the requirement of three specific expert groups (agriculture, forestry, and urban). An optimum Thaichote pan-sharpening method for agriculture, forestry, and urban applications can be summarized in the following sections.

(1) Agriculture application. An optimum pan-sharpening method for Thaichote image in agriculture application is GS. However, HPF can be chosen as an optimum pan-sharpening method when ENVI software is unavailable.

(2) Forestry application. An optimum pan-sharpening method for Thaichote image in forestry application is GS. Similar to agriculture application, HPF can be chosen as an optimum pan-sharpening method when only ERDAS Imagine software is available.

(3) Urban application. An optimum pan-sharpening method for Thaichote image in urban application is GS. However, BT can be chosen as an optimum method when ENVI software is not available.

(4) For three applications. An optimum pan-sharpening method for Thaichote image in three applications (agriculture, forestry, and urban) is GS. Herein if ENVI software is not available, the HPF can be selected as an optimum pan-sharpening method. In addition, WT is the least appropriate method for Thaichote pan-sharpening production in these applications.

5.1.4 Effect of resampling techniques on Thaichote image pan-sharpening

Three widely used resampling techniques requiring in pan-sharpening process (BT, MT, PCA, IHST, MIHST, EF, and GS) including nearest neighbor (NN), bilinear interpolation (BIL), and cubic convolution (CUB) were here examined its effect on Thaichote pan-sharpened images by using UIQI.

As a result, the UIQI values from each resampling technique in each pan-sharpening method are slightly different except BT method. The average UIQI values for NN, BIL and CUB resampling techniques are 0.5676, 0.5452, and 0.5409 respectively. Herewith, it is evident that the NN resampling technique is the most appropriate method for image pan-sharpening production. This can be used as a guideline for Thaichote image pan-sharpening production in the future.

In conclusion, the integration of image quality criteria (VIA, EDA, QI, and ECA) with users' requirement using the SAW technique of MCDA can quantify and identify an optimum pan-sharpening method for Thaichote image in agriculture, forestry, and urban applications.

5.2 Recommendations

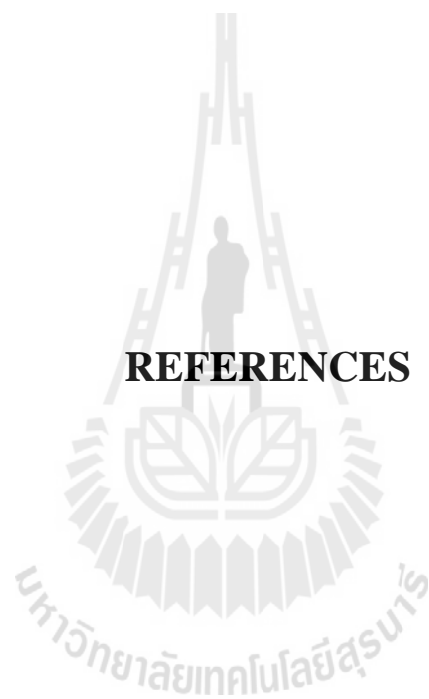
Although, this study has been successfully fulfilled all of research objectives, image quality evaluation procedure of Thaichote image pan-sharpening should be continued with new aspects or study sites. Understanding comprehensive information product of the Thaichote pan-sharpening will be more useful to Thaichote users in various fields. In order to achieve this, there are some recommendations, which are related to image pan-sharpening methods and image quality evaluation, derived from research experiences for the future research.

(1) Based on the users' requirement by questionnaire, it is found that all correspondents in three focus groups (agriculture, forestry, and urban) prefer to used Thaichote pan-sharpening data for visual interpretation. So, evaluator for visual image analysis criteria should be professionals who have good experience in visual interpretation and knowledge about pan-sharpening process to justify the image quality.

(2) Due to the rapid development of pan-sharpening methods, new related methods which provide the best results for another satellite should be examined in more details such as Zhang method smoothing filter (SF), and local mean and variance matching (LMVM).

(3) In this study, pan-sharpening process is implemented by the default setting which provides in digital image processing software. However, some selective methods including EF, HPF, MIHST, WT, and EF offer more options for parameter setting in pan-sharpening process. Thus, systematic design for the experiment may be required to fulfill this recommendation.

(4) The selected study areas in this research based on the major land use class for each application (agriculture, forestry, and urban) is applied to evaluate the image quality. However, this condition is rarely found in real environment. Therefore, the mixture of land use and land cover categories may be selected as study site to evaluate image quality for general applications.



REFERENCES

REFERENCES

- Brown, J. D. (2001). **Using surveys in language programs**. Cambridge. UK: Cambridge University Press.
- Carter, D. B. (1998). **Analysis of Multiresolution Data Fusion Techniques**. Master of Science. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Choi, M. (2006). A new intensity-hue-saturation fusion approach to image fusion with a tradeoff parameter. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 44(6): 1672-1682.
- Ding, Y. and Wang, Y. (2011). Analysis and evaluation on fusion methods of medium and high spatial resolution remote sensing image. In **International Conference on Geoinformatics**. Shanghai, China.
- Dornyei, Z. (2003). **Questionnaires in second language research: Construction, Administration and Processing**. New Jersey: Lawrence Erlbaum, Inc., Publishers.
- Du, Q., Younan, N. H., King, R., and Shah, V. P. (2007). On the Performance Evaluation of Pan-Sharpener Techniques. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, 4(4): 518-522.
- Ehlers, M. (2008). Multi-image Fusion in Remote Sensing: Spatial Enhancement vs. Spectral Characteristics Preservation. In G. Bebis, R. Boyle, B. Parvin, D. Koracin, P. Remagnino, F. Porikli, J. Peters, J. Klosowski, L. Arns, Y. Chun,

- T.-M. Rhyne, and L. Monroe (eds.). **Advances in Visual Computing** (Vol. 5359, pp. 75-84): Springer: Berlin.
- Ehlers, M. and Klonus, S. (2010). Ehlers Fusion [On-line]. Available: <http://www.igf.uni-osnabrueck.de/en/2201.htm>.
- Gangkofner, U. G., Pradhan, P. S., and Holcomb, D. W. (2008). Optimizing the high-pass filter addition technique for image fusion. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 74(9): 1107-1118.
- Gao, J. (2008). **Digital Analysis of Remotely Sensed Imagery**. McGraw-Hill Professional.
- Gaoxiang, H., Kaewmanee, M., and Bignone, F. (2009). Test and assessment of THEOS satellite capability for mapping. In **MapAsia 2009**. Singapore.
- Garguet-Duport, B., Girel, J., Chassery, J.-M., and Pautou, G. (1996). The Use of Multiresolution Analysis and Wavelets Transform for Merging SPOT Panchromatic and Multispectral Image Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 62(9): 1057-1068.
- GISTDA (2009). **THEOS user guide** [On-line]. Available: http://new.gistda.or.th/gistda_n/index.php/dltechnical/doc_download/128-.
- Gonzalez, R. C. and Woods, R. E. (2002). **Digital Image Processing** (2nd ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Hely, A. K., Nasr, A. H., and Taweel, G. S. E. (2010). Assessment and Evaluation of Different Data Fusion Techniques. *International Journal of Computers*. 4(4): 107-115.

- Intajag, S., Wettayaprasit, W., and Kodchabudthada, W. (2010). Evaluation of fusion techniques for Pan-sharpened THEOS imagery. In **International Conference on Control Automation and Systems** (pp. 1010-1014). Korea.
- Jensen, J. R. (2007). **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective** (2nd ed.). Prentice Hall.
- Klonus, S. and Ehlers, M. (2009). Performance of evaluation methods in image fusion. In **International Conference on Information Fusion. FUSION '09.** (pp. 1409-1416).
- Laben, C. A. and Brower, B. V. (2000). Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using Pan-sharpening. United States Patent No. 6011875.
- Leica Geosystems Geospatial Imaging (2008). **ERDAS Field Guide.** 2: 354.
- Lerk-u-suke, S., and Santitamont, P. (2009). THEOS Sensor modeling and Its Assessment [Slide]. In **GEOINFOTECH2009 conference.** Thailand.
- Li, S, and Li, Z. (2010). Effects of image fusion algorithms on classification accuracy. In **International Conference on Geoinformatics.** China.
- Malczewski, J. (1999). **GIS and Multicriteria Decision Analysis.** New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Parcharidis, I. and Kazi-Tani, L. M. (2000). Landsat TM and ERS data fusion: a statistical approach evaluation for four different methods. In **Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2000. IEEE 2000 International.** (pp. 2120-2122).
- Rosenfeld, A. and Kak, A. C. (1982). **Digital Picture Processing** (2nd ed.). New York: Academic Press.

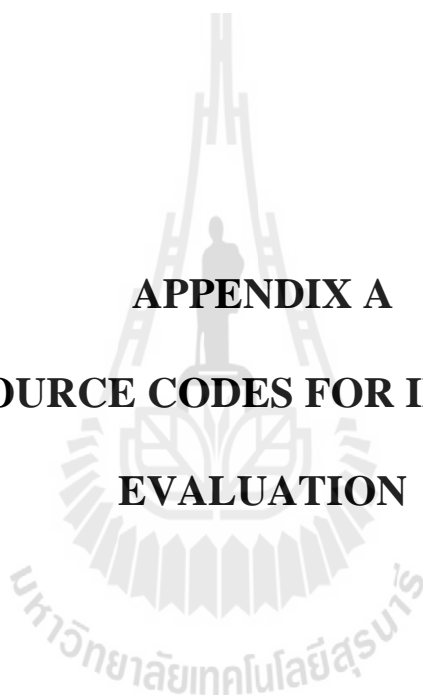
- Sachs, J. (2001). Image Resampling [On-line]. Available: <http://ftp2.bmtmicro.com/dlc/Resampling.pdf>.
- Shettigara, V. K. (1992). A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. 58: 561-567.
- Siddiqui, Y. (2003). The Modified IHS Method for Fusing Satellite Imagery. In **ASPRS Annual Conference Proceedings**. USA.
- Simon, H. A. (1960). **The new science of management decision**. New York: Harper & Row.
- Sonka, M., Hlavac, V., and Boyle, R. (2008). **Image Processing: Analysis and Machine Vision** (3rd ed.). USA: Thomson.
- Stathaki, T. (Ed.). (2008). **Image Fusion: Algorithms and Applications**. Academic Press.
- Strait, M., Rahmani, S., and Markurjev, D. (2008). Evaluation of Pan-Sharpener Methods [On-line]. Available: http://www.math.ucla.edu/~wittman/reu2008/Reports/pan_report.pdf.
- Tu, T. M., Huang, P. S., Hung, C.-L., and Chang, C.-P. (2004). A fast intensity-hue-saturation fusion technique with spectral adjustment for IKONOS imagery. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**. 1(4): 309-312.
- Ute, G. G., Pradhan, P. S., and Holcomb, D. W. (2008). Optimizing the High-Pass Filter Addition Technique for Image Fusion. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. 74(9): 1107-1118.
- Vijayaraj, V. (2004). **A Quantitative Analysis of Pansharpened Images**. Master of Science, Mississippi State University, Mississippi.

- Wang, Z. and Bovik, A. C. (2002), A Universal Image Quality Index. **IEEE Signal Processing Letters**. 9(3): 81-84.
- Wolf, P. R. and Dewitt, B. A. (2000). **Elements of Photogrammetry: With Applications in GIS** (3rd. ed.). McGraw-Hill.
- Zhang, Y. (2004). Understanding Image Fusion. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. 70: 657-659.
- Zhang, Y. (2008). Pan-sharpening for improved information extraction. In Z. Li, C. Jun and E. Baltsavias (Eds.). **Advances in photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences**. CRC Press.
- Zhang, Y. and Misha, R. K. (2012). A review and comparison of commercially available pan-sharpening techniques for high resolution satellite image fusion. In **Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2012. IEEE 2012 International**. (pp. 182-185).



APPENDICES

APPENDIX A
MATLAB SOURCE CODES FOR IMAGE QUALITY
EVALUATION



A.1 Reading and preparing an image file

```

% ##### Satellite Image #####
% Pan = Panchromatic image
% MS = MultiSpectral image
% PS = Pan-sharpened image
% Input Files (THEOS image) #####
Pan = imread('');
MS = imread('');
PS = imread('');
% ##### Matrix preparation
MS = double(MS);
PS = double(PS);

[m,n,d] = size(Pan); [m,n,d] = size(MS); [m,n,d] = size(PS);

pan1 = Pan(:,:,1); pan2 = Pan(:,:,2); pan3 = Pan(:,:,3); pan4 = Pan(:,:,4);
MS1 = MS(:,:,1); MS2 = MS(:,:,2); MS3 = MS(:,:,3); MS4 = MS(:,:,4);
PS1 = PS(:,:,1); PS2 = PS(:,:,2); PS3 = PS(:,:,3); PS4 = PS(:,:,4);
% ##### Reshape the matrix
rsMS1 = reshape(MS1,[m*n,1]); rsMS2 = reshape(MS2,[m*n,1]); rsMS3 = reshape(MS3,[m*n,1]);
rsMS4 = reshape(MS4,[m*n,1]);

rsPS1 = reshape(PS1,[m*n,1]); rsPS2 = reshape(PS2,[m*n,1]); rsPS3 = reshape(PS3,[m*n,1]);
rsPS4 = reshape(PS4,[m*n,1]);

% ##### Basic stats
N = 2,249,999; % (1500x1500) - 1 (Size of image)

stdMS1 = std2(MS1); stdMS2 = std2(MS2); stdMS3 = std2(MS3); stdMS4 = std2(MS4);

stdPS1 = std2(PS1); stdPS2 = std2(PS2); stdPS3 = std2(PS3); stdPS4 = std2(PS4);

meanMS1 = mean2(MS1); meanMS2 = mean2(MS2); meanMS3 = mean2(MS3);
meanMS4 = mean2(MS4);

meanPS1 = mean2(PS1); meanPS2 = mean2(PS2); meanPS3 = mean2(PS3); meanPS4 = mean2(PS4);

sqdiffMeanMS1 = (MS1 - meanMS1)^2; sqdiffMeanMS2 = (MS2 - meanMS2)^2;
sqdiffMeanMS3 = (MS3 - meanMS3)^2; sqdiffMeanMS4 = (MS4 - meanMS4)^2;

sqdiffMeanPS1 = (PS1 - meanPS1)^2; sqdiffMeanPS2 = (PS2 - meanPS2)^2;
sqdiffMeanPS3 = (PS3 - meanPS3)^2; sqdiffMeanPS4 = (PS4 - meanPS4)^2;

varMS1 = sum(sqdiffMeanMS1(:))/N; varMS2 = sum(sqdiffMeanMS2(:))/N;
varMS3 = sum(sqdiffMeanMS3(:))/N; varMS4 = sum(sqdiffMeanMS4(:))/N;

varPS1 = sum(sqdiffMeanPS1(:))/N; varPS2 = sum(sqdiffMeanPS2(:))/N;
varPS3 = sum(sqdiffMeanPS3(:))/N; varPS4 = sum(sqdiffMeanPS4(:))/N;

stdMSPS1 = sum(sum((MS1 - meanMS1).*(PS1 - meanPS1)))/N;
stdMSPS2 = sum(sum((MS2 - meanMS2).*(PS2 - meanPS2)))/N;
stdMSPS3 = sum(sum((MS3 - meanMS3).*(PS3 - meanPS3)))/N;
stdMSPS4 = sum(sum((MS4 - meanMS4).*(PS4 - meanPS4)))/N;

```

A.2 Sobel edge detection and correlation coefficient calculation

```
SobelPan = double(edge(Pan, 'sobel')); SobelPS1 = double(edge(PS1, 'sobel'));
SobelPS2 = double(edge(PS2, 'sobel')); SobelPS3 = double(edge(PS3, 'sobel'));
SobelPS4 = double(edge(PS4, 'sobel'));
CC_SobelPS1 = corrcoef(SobelPan, SobelPS1);
CC_SobelPS2 = corrcoef(SobelPan, SobelPS2);
CC_SobelPS3 = corrcoef(SobelPan, SobelPS3);
CC_SobelPS4 = corrcoef(SobelPan, SobelPS4);
CC1 = CC_SobelPS1(2,1);
CC2 = CC_SobelPS2(2,1);
CC3 = CC_SobelPS3(2,1);
CC4 = CC_SobelPS4(2,1);
```

A.3. Laplacian edge detection and correlation coefficient calculation

```
LaplacianPan = double(edge((Pan), 'log')); LaplacianPS1 = double(edge((PS1), 'log'));
LaplacianPS2 = double(edge((PS2), 'log'));LaplacianPS3 = double(edge((PS3), 'log'));
LaplacianPS4 = double(edge((PS4), 'log'));
CC_LaplacianPS1 = corrcoef(LaplacianPan, LaplacianPS1);
CC_LaplacianPS2 = corrcoef(LaplacianPan, LaplacianPS2);
CC_LaplacianPS3 = corrcoef(LaplacianPan, LaplacianPS3);
CC_LaplacianPS4 = corrcoef(LaplacianPan, LaplacianPS4);
CC1 = CC_LaplacianPS1(2,1);
CC2 = CC_LaplacianPS2(2,1);
CC3 = CC_LaplacianPS3(2,1);
CC4 = CC_LaplacianPS4(2,1);
```

A.4 RMSE computation

```
d1 = MS1 - PS1; d2 = MS2 - PS2; d3 = MS3 - PS3; d4 = MS4 - PS4;
d1sq = (d1.^2); d2sq = (d2.^2); d3sq = (d3.^2); d4sq = (d4.^2);
sum_d1sq = sum(sum(d1sq))/(m*n); sum_d2sq = sum(sum(d2sq))/(m*n);
sum_d3sq = sum(sum(d3sq))/(m*n); sum_d4sq = sum(sum(d4sq))/(m*n);
RMSE1 = sqrt(sum_d1sq);
RMSE2 = sqrt(sum_d2sq);
RMSE3 = sqrt(sum_d3sq);
RMSE4 = sqrt(sum_d4sq);
```

A.5 CC computation

```
CC = corrcoef(MS, PS);
CC = CC(2,1);
```

A.6 RM computation

```
RM1 = (mean(rsPS1)-mean(rsMS1))/mean(rsMS1)*100;
RM2 = (mean(rsPS2)-mean(rsMS2))/mean(rsMS2)*100;
RM3 = (mean(rsPS3)-mean(rsMS3))/mean(rsMS3)*100;
RM4 = (mean(rsPS4)-mean(rsMS4))/mean(rsMS4)*100;
```

A.7 RASE computation

```
RASE1 = (100/(mean(mean(MS1))))*(sqrt(RMSE1^2));
RASE2 = (100/(mean(mean(MS2))))*(sqrt(RMSE2^2));
RASE3 = (100/(mean(mean(MS3))))*(sqrt(RMSE3^2));
RASE4 = (100/(mean(mean(MS4))))*(sqrt(RMSE4^2));
```

A.8 ERGAS computation

```
ergas1 = (RMSE1/(mean(mean(MS1))))^2;
ergas2 = (RMSE2/(mean(mean(MS2))))^2;
ergas3 = (RMSE3/(mean(mean(MS3))))^2;
ergas4 = (RMSE4/(mean(mean(MS4))))^2;
ergas = sqrt((ergas1+ ergas2+ ergas3+ ergas4)/4);
ERGAS = 13.33333333*ergas;
```

A.9 SAM computation

```
V = (MS);
Vh= (PS);
VV=[ ];VhVh=[ ];VVh=[ ];
for i=1:4 % Use 4 bands
    VV(:,i) = V(:,i).^2;
    VhVh(:,i) = Vh(:,i).^2;
    VVh(:,i) = V(:,i).*Vh(:,i);
end
sumVVh = sum(sum(sum(VVh)));
sumVV = sqrt(sum(sum(sum(VV))));
sumVhVh = sqrt(sum(sum(sum(VhVh))));
a = (sumVVh./(sumVV*sumVhVh));
SAM = acosd(a);
```

A.10 UIQI computation

```
Q1b1 = stdMSPS1/(stdMS1*stdPS1); Q1b2 = stdMSPS2/(stdMS2*stdPS2);
Q1b3 = stdMSPS3/(stdMS3*stdPS3); Q1b4 = stdMSPS4/(stdMS4*stdPS4);
Q2b1 = (2*(meanMS1*meanPS1))/((meanMS1^2)+(meanPS1^2));
Q2b2 = (2*(meanMS2*meanPS2))/((meanMS2^2)+(meanPS2^2));
Q2b3 = (2*(meanMS3*meanPS3))/((meanMS3^2)+(meanPS3^2));
Q2b4 = (2*(meanMS4*meanPS4))/((meanMS4^2)+(meanPS4^2));
Q3b1 = (2*stdMS1*stdPS1)/((stdMS1^2) + (stdPS1^2));
Q3b2 = (2*stdMS2*stdPS2)/((stdMS2^2) + (stdPS2^2));
Q3b3 = (2*stdMS3*stdPS3)/((stdMS3^2) + (stdPS3^2));
Q3b4 = (2*stdMS4*stdPS4)/((stdMS4^2) + (stdPS4^2));
UIQI1 = Q1b1 * Q2b1 * Q3b1;
UIQI2 = Q1b2 * Q2b2 * Q3b2;
UIQI3 = Q1b3 * Q2b3 * Q3b3;
UIQI4 = Q1b4 * Q2b4 * Q3b4;
```



APPENDIX B
DISTRIBUTED QUESTIONNAIRE TO EXPERTS

การประยุกต์ใช้งานด้านเกษตรกรรม (Agriculture application)

แบบสอบถาม เรื่อง การประเมินคุณภาพ การปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยว สำหรับข้อมูลภาพดาวเทียมธีออส (Questionnaire for quality assessing the optimum pan-sharpening method for THEOS satellite imagery)

1. วัตถุประสงค์ของแบบสอบถาม

- เพื่อประเมินความต้องการของกลุ่มผู้ใช้งานเฉพาะทาง (ด้านเมือง เกษตรกรรมและป่าไม้) ที่มีต่อข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยวิธีการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยว (Pan-sharpening method) ที่แตกต่างกัน ให้เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานเฉพาะทาง (ด้านเมือง เกษตรกรรมและป่าไม้)

2. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยวสำหรับข้อมูลภาพดาวเทียม

2.1 การปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยว (Pan-sharpening method) การปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยว เป็นกระบวนการเพื่อเพิ่มความคมชัดของข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น (Multispectral image) ที่มีความละเอียดเชิงสเปกตรัม (Spectral resolution) สูง ด้วยข้อมูลภาพช่วงคลื่นเดี่ยว (Panchromatic image) ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ (Spatial resolution) สูง ดังนั้น เมื่อนำข้อมูลภาพทั้งสองมาทำการประมวลผลด้วยวิธีการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยวแล้ว จะทำให้ได้ข้อมูลภาพที่มีความละเอียดเชิงสเปกตรัมและเชิงพื้นที่สูง โดยข้อมูลภาพที่ได้รับจากวิธีการนี้จะเรียกว่า ข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยว (Pan-sharpened image)

กระบวนการดังกล่าวมีเป้าหมายหลักคือ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารสนเทศจากข้อมูลภาพ (Information extraction) ซึ่งได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน วิธีการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยวสามารถดำเนินการได้หลายวิธี สำหรับวิธีการที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วย

- 1) วิธีการแปลงแบบโบว์วี (Brovey transformation - BT)
- 2) วิธีการแปลงแบบการคูณ (Multiplicative transformation - MT)
- 3) วิธีการแปลงความเข้ม/สี/การอิ่มตัว (Intensity Hue Saturation transformation - IHST)

- 4) วิธีการตัดแปลงความเข้ม/สีสั่น/การอ้อมตัว (Modified IHS transformation - MIHST)
- 5) วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis - PCA)
- 6) วิธีการแปลงแบบเวฟเล็ต (Wavelet transformation - WT)
- 7) วิธีการแปลงแบบออคัสตัวกรองความถี่สูง (High Pass Filter - HPF)
- 8) วิธีการหลอมรวมข้อมูลแบบ Ehlers (EF)
- 9) วิธีการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพแบบ Gram-Schmidt (GS)

วิธีการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพในแต่ละวิธีจะมีจุดเด่นและจุดด้อยแตกต่างกัน เช่น ความคมชัดของวัตถุที่ปรากฏบนภาพ การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าความสว่าง ผลกระทบต่อสีสั่นของข้อมูลภาพ คุณภาพของลายผิว (texture quality) การรักษาคุณสมบัติเชิงสเปกตรัมของข้อมูลภาพ (Spectral information preservation) การรักษาคุณสมบัติเชิงพื้นที่ของข้อมูลภาพ (Spatial information preservation) ความซับซ้อนในการประมวลผลข้อมูลภาพ หรือผลกระทบต่อความถูกต้องของการจำแนก (Effect on image classification) เป็นต้น

2.2 การประเมินคุณภาพข้อมูลภาพ (Evaluation of Image quality)

การประเมินคุณภาพข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยวนั้นมีเป้าหมายหลักคือ เพื่อวัดระดับความเหมาะสมและความสอดคล้องของการนำข้อมูลดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานเฉพาะทาง โดยทั่วไปการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพจะพิจารณาจากค่าดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพ (**Image quality index**) เป็นหลัก โดยไม่นำความต้องการของผู้ใช้งานเฉพาะทางมาพิจารณา ดังนั้น ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง เพื่อคัดเลือกและกำหนดเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพข้อมูลซึ่งเป็นที่ยอมรับและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ โดยออกแบบสอบถามเพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทาง (ด้านเมือง เกษตรกรรมและป่าไม้) เป็นผู้พิจารณาให้ค่านำหนักที่เหมาะสมสำหรับแต่ละเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพข้อมูล ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้มีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินดังต่อไปนี้

2.2.1 การประเมินคุณภาพด้วยสายตา (Visual judgment)

การประเมินคุณภาพด้วยสายตา เป็นกระบวนการที่นิยมใช้สำหรับการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพเบื้องต้น เนื่องจากผู้ใช้งานสามารถทำการประเมินได้ด้วยตนเองโดยไม่ต้องใช้เครื่องมือหรือการประมวลผลที่ซับซ้อน แต่แนวทางนี้จะอาศัยการวิเคราะห์ด้วยสายตา (Visual analysis) ภายใต้ระบบการมองเห็นของมนุษย์ (Human visual system) เป็นหลัก แม้ว่าเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพนี้จะดูสมเหตุสมผลสำหรับนำข้อมูลภาพไปใช้งาน แต่ผลการ

ประเมิน จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับรู้และการมองเห็นของมนุษย์ที่มีความแตกต่างกัน ตลอดจน ทักษะ ความชำนาญ และประสบการณ์ของผู้ประเมิน

ในการประเมินคุณภาพด้วยสายตาจะอาศัยองค์ประกอบพื้นฐาน ที่นำมาใช้ในการแปลตีความข้อมูลภาพด้วยสายตา (Fundamental elements of visual image interpretation) ซึ่งจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างข้อมูลภาพต้นฉบับ (ข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น) กับ ข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวขององค์ประกอบพื้นฐานที่ใช้ในการแปลตีความด้วยสายตา ดังต่อไปนี้

- โทนสี (Tone)
- สีสรร (Color)
- ขนาด (Size)
- รูปร่าง (Shape)
- ลายผิว (Texture)
- รูปแบบ (Pattern)
- ที่ตั้งและการร่วมกลุ่ม (Site and Association)

ตัวอย่างผลการประเมินคุณภาพด้วยสายตา โดยผู้วิจัยที่พิจารณาจากภาพสีผสมของผลลัพธ์จากการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียว ที่แตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลต้นฉบับ สำหรับการนำไปใช้แปลตีความด้วยสายตาในพื้นที่ต้นแบบทางด้านเกษตรกรรม (ภาพที่ 1) ซึ่งประกอบด้วยตัวอย่างข้อมูลภาพคุณภาพดี ปานกลางและเลวสำหรับการแปลตีความด้วยสายตา



(a) ข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น



(b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี



(c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง



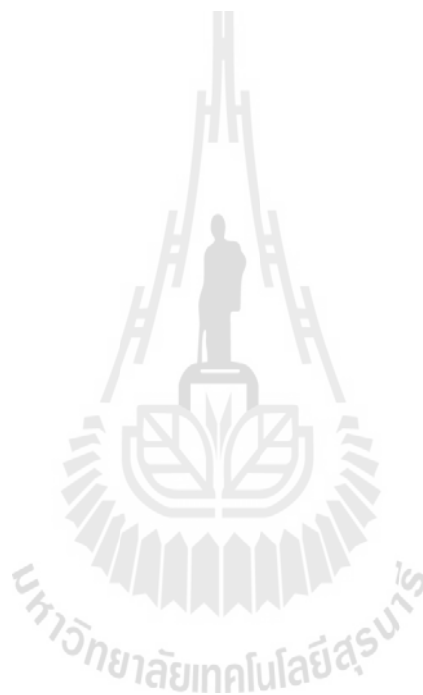
(d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว

ภาพที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลภาพต้นฉบับและข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวโดยวิธีการที่แตกต่างกันจากการประเมินด้วยสายตาโดยผู้วิจัย (a) ข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น (b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี (c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง (d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว

2.2.2 การวิเคราะห์การตรวจจับเส้นขอบ (Edge detection analysis)

เป็นการประเมินค่าทางสถิติของข้อมูลภาพจะใช้วิธีการตรวจจับเส้นขอบ (Edge detection) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งของการเน้นความคมชัดข้อมูลภาพ (image enhancement) โดยอาศัยตัวกรองเชิงพื้นที่ (Spatial filter) 2 รูปแบบ (Sobel และ Laplacian) นำมาปฏิบัติการกับข้อมูลภาพต้นฉบับแบบช่วงคลื่นเดียวและข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวจากวิธีการต่างๆ และทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) เพื่อใช้วัดค่าความคล้ายคลึงกันสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลต้นฉบับแบบช่วงคลื่นเดียวและข้อมูลภาพที่

ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียว ซึ่งบ่งบอกถึงการรักษาคุณสมบัติเชิงพื้นที่ (Spatial property preservation) ตัวอย่างของการตรวจจับเส้นขอบและผลการประเมินค่าทางสถิติของข้อมูลภาพ (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์) ของข้อมูลภาพต้นฉบับและข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวโดยวิธีการที่แตกต่างกันสำหรับพื้นที่ต้นแบบทางด้านเกษตรกรรมแสดงไว้ในภาพที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยตัวอย่างข้อมูลภาพที่เก็บรักษาคุณสมบัติเชิงพื้นที่ในระดับดี ปานกลางและเลว





(a) ข้อมูลภาพที่ประมวลผลจากข้อมูลช่วงคลื่นเดียว
(ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 1.00)

(b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี
(ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.88)



(c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง
(ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.53)

(d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว
(ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.02)

ภาพที่ 2 ตัวอย่างของการตรวจจับเส้นขอบและผลการประเมินค่าทางสถิติของข้อมูลภาพ (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์) จากการตรวจจับเส้นขอบกับข้อมูลภาพต้นฉบับ (ข้อมูลภาพช่วงคลื่นเดียว) และข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวโดยวิธีการที่แตกต่างกัน (a) ข้อมูลภาพที่ประมวลผลจากข้อมูลช่วงคลื่นเดียว (b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี (c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง (d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว

2.2.3 การประเมินค่าดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพ (Image Quality indices)

ดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพเป็นตัวประเมินเชิงปริมาณ ที่ใช้วัดความเพี้ยน (Distortion) ที่เกิดขึ้นในแต่ละวิธีของการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียว โดยอาศัยการเปรียบเทียบค่าทางสถิติ ที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ระหว่างข้อมูลต้นฉบับ (ข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น) และข้อมูลที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพ

ดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบด้วย

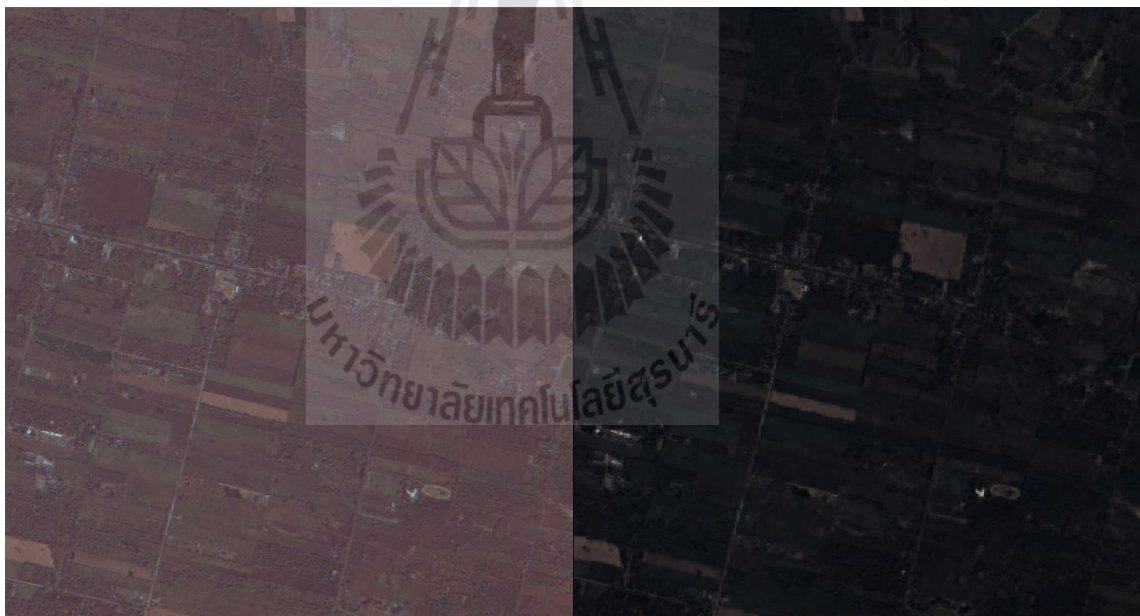
- ความคลาดเคลื่อนรากกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error)
- สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient)
- การเคลื่อนสัมพัทธ์ของค่าเฉลี่ย (Relative shift of the mean)
- ความคลาดเคลื่อนสเปกตรัมเฉลี่ยสัมพัทธ์ (Relative Average Spectral Error)
- ความคลาดเคลื่อนโดยรวมแบบไร้มิติสัมพัทธ์ (Relative dimensionless global error in synthesis – ERGAS)
- การทำแผนที่มุมเชิงสเปกตรัม (Spectral Angle Mapping)
- ดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพสากล (Universal Image Quality Index)

ตัวอย่างของผลการประเมิน ที่ได้รับจากดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพสากลระหว่างข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่นและข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพโดย 3 วิธีการในพื้นที่ต้นแบบทางด้านเกษตรกรรม (ภาพที่ 3) ซึ่งประกอบด้วยตัวอย่างข้อมูลภาพและค่าดัชนีคุณภาพใน 3 ระดับ (ดี ปานกลางและเลว) ที่พิจารณาจากค่าทางสถิติที่วัดได้



(a) ข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น
(ค่าดัชนีคุณภาพเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์)

(b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี
(ค่าดัชนีคุณภาพเท่ากับ 77 เปอร์เซ็นต์)



(c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง
(ค่าดัชนีคุณภาพเท่ากับ 56 เปอร์เซ็นต์)

(d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว
(ค่าดัชนีคุณภาพเท่ากับ 16 เปอร์เซ็นต์)

ภาพที่ 3 ตัวอย่างผลการประเมินที่ได้รับจากดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพสากลระหว่างข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่นและข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพโดยวิธีการที่ต่างกันไป (a) ข้อมูลภาพแบบหลายช่วงคลื่น (b) คุณภาพดี (c) คุณภาพปานกลาง (d) คุณภาพเลว

2.2.4 การประเมินคุณภาพค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพ (Effect on classification accuracy)

ในการประเมินคุณภาพค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพจะพิจารณาจากค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall accuracy) และค่าสัมประสิทธิ์แคปปา (Kappa hat coefficient) ของผลการจำแนกข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพ โดยวิธีการจำแนกแบบไม่กำกับดูแล (Unsupervised classification) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำแนกข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น โดยวิธีการจำแนกแบบไม่กำกับดูแล ข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวที่ให้ผลการจำแนกที่มีความความถูกต้อง โดยรวมสูงจะบ่งชี้ถึงการรักษาคุณสมบัติเชิงสเปกตรัม (Spectral property preservation) ที่สูง

ตัวอย่างข้อมูลภาพต้นฉบับ (ข้อมูลภาพแบบหลายช่วงคลื่น) และข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียว ที่ได้รับจากหลายวิธีการที่แตกต่างกัน และค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall accuracy) ของพื้นที่ต้นแบบทางด้านเกษตรกรรมแสดงไว้ในภาพที่ 4



(a) ข้อมูลภาพแบบหลายช่วงคลื่น
(ความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลเท่ากับ 100
เปอร์เซ็นต์)

(b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี
(ความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลเท่ากับ 66
เปอร์เซ็นต์)



(c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง
(ความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลเท่ากับ 46
เปอร์เซ็นต์)

(d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว
(ความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลเท่ากับ 17
เปอร์เซ็นต์)

ภาพที่ 4 ตัวอย่างผลการประเมินคุณภาพค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพที่พิจารณาจากค่าความถูกต้องโดยรวม (a) ข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น (b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี (c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง (d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว

3. ข้อมูลผู้ตอบแบบสอบถาม

หน่วยงานผู้ตอบแบบสอบถาม _____

ชื่อ-นามสกุล _____

ตำแหน่ง _____

การประยุกต์ใช้งานข้อมูลภาพดาวเทียม

- เกษตรกรรม (Agriculture application)
- ป่าไม้ (Forestry application)
- เมือง (Urban application)
- อื่นๆ (โปรดระบุ) _____

4. การประเมินความต้องการของผู้ใช้งาน

4.1 ภาพรวมผลการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพโดยผู้วิจัย

จากเกณฑ์และตัวอย่างผลการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพ ซึ่งประกอบด้วย (1) การประเมินคุณภาพด้วยสายตา (Visual judgment) (2) การวิเคราะห์การตรวจจับเส้นขอบ (Edge detection analysis) (3) การประเมินค่าดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพ (Image Quality indices) และ (4) การประเมินคุณภาพค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพ (Effect on classification accuracy) ที่นำเสนอโดยผู้วิจัยดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปภาพรวมของข้อมูลเชิงปริมาณและคุณภาพของแต่ละเกณฑ์และวิธีการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยวที่แตกต่างกัน ดังแสดงตัวอย่างไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นการพิจารณาจากความรู้ ทักษะ และประสบการณ์ของผู้วิจัยเพียงผู้เดียว

ตารางที่ 1 ตัวอย่างผลการประเมินคุณภาพเทคนิคการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านเกษตรกรรม

วิธีการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพ	การประเมินด้วยสายตา	การวิเคราะห์การตรวจจับเส้นขอบ	การประเมินด้วยค่าดัชนีคุณภาพ	การประเมินด้วยค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อมูล
BT	8	6	6	2
MT	3	4	4	5
PCA	10	5	8	2
IHST	8	6	2	3
MIHST	9	6	9	4
HPF	10	8	9	5
WT	5	0	3	5
EF	7	6	9	6
GS	10	6	9	2

4.2 การประเมินความต้องการของผู้ใช้งาน

จากข้อมูลพื้นฐานและภาพรวมผลการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพโดยผู้วิจัย ดังอธิบายไว้ข้างต้น ท่านในฐานะเป็นผู้เชี่ยวชาญและเป็นตัวแทนของกลุ่มผู้ใช้งานเฉพาะทาง (ด้านเมือง เกษตรกรรมและป่าไม้) สำหรับการนำข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยวิธีการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียว ที่แตกต่างกันไปประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสมกับการกิจของหน่วยงาน ท่านคิดว่า ในการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพตามความต้องการของผู้ใช้งาน ควรมีสัดส่วนค่าน้ำหนักของแต่ละเกณฑ์เป็นอย่างไร? (โปรดระบุสัดส่วนตามความสำคัญของเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพ)

การประเมินคุณภาพด้วยสายตา	สัดส่วน _____ %
การประเมินค่าทางสถิติของข้อมูลภาพ	สัดส่วน _____ %
การประเมินค่าดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพ	สัดส่วน _____ %
การประเมินคุณภาพค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพ	สัดส่วน _____ %
	รวม 100 %

อนึ่ง ค่าน้ำหนักที่ได้รับจากผู้เชี่ยวชาญในแต่ละท่าน จะถูกนำไปประมวลผลเพื่อประเมินหาวิธีการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวที่เหมาะสม สำหรับการประยุกต์ใช้งานเฉพาะทาง (ด้านเมือง เกษตรกรรมและป่าไม้) ต่อไป ด้วยวิธี Simple Additive Weighting (SAW) ที่คำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$A = \sum_j w_j x_{ij}$$

เมื่อ A คือ ผลคะแนนรวมของแต่ละวิธีการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียว

x_{ij} คือ ค่าคะแนนของวิธีการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวแต่ละวิธีที่ได้จากการประเมินคุณภาพ โดยผู้วิจัย

w_j คือ ค่าน้ำหนักแต่ละเกณฑ์การประเมินคุณภาพที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญ



การประยุกต์ใช้งานด้านป่าไม้ (Forest application)

แบบสอบถาม เรื่อง การประเมินคุณภาพ การปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยว สำหรับข้อมูลภาพดาวเทียมธีออส (Questionnaire for quality assessing the optimum pan-sharpening method for THEOS satellite imagery)

1. วัตถุประสงค์ของแบบสอบถาม

- เพื่อประเมินความต้องการของกลุ่มผู้ใช้งานเฉพาะทาง (ด้านเมือง เกษตรกรรมและป่าไม้) ที่มีต่อข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยวิธีการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยว (Pan-sharpening method) ที่แตกต่างกัน ให้เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานเฉพาะทาง (ด้านเมือง เกษตรกรรมและป่าไม้)

2. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยวสำหรับข้อมูลภาพดาวเทียม

การปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยว (Pan-sharpening method)

การปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยวเป็นกระบวนการเพิ่มความคมชัดของข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น (Multispectral image) ที่มีความละเอียดเชิงสเปกตรัม (spectral resolution) สูง ด้วยข้อมูลภาพช่วงคลื่นเดี่ยว (Panchromatic image) ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ (spatial resolution) สูง ดังนั้น เมื่อนำข้อมูลภาพทั้งสองมาทำการประมวลผลด้วยวิธีการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยวแล้ว จะทำให้ได้ข้อมูลภาพที่มีความละเอียดเชิงสเปกตรัมและเชิงพื้นที่สูง โดยข้อมูลภาพที่ได้รับจากวิธีการนี้จะเรียกว่า ข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยว (Pan-sharpened image)

กระบวนการดังกล่าวมีเป้าหมายหลักคือ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารสนเทศจากข้อมูลภาพ (Information extraction) ซึ่งได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน วิธีการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยวสามารถดำเนินการได้หลายวิธี สำหรับวิธีการที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วย

- 1) วิธีการแปลงแบบโบว์รี (Brovey transformation - BT)
- 2) วิธีการแปลงแบบการคูณ (Multiplicative transformation - MT)
- 3) วิธีการแปลงความเข้ม/สี/การอิ่มตัว (Intensity Hue Saturation transformation - IHST)

- 4) วิธีการตัดแปลงความเข้ม/สีสັນ/การอ้อมตัว (Modified IHS transformation - MIHST)
- 5) วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis - PCA)
- 6) วิธีการแปลงแบบเวฟเล็ต (Wavelet transformation - WT)
- 7) วิธีการแปลงแบบอาศัยตัวกรองความถี่สูง (High Pass Filter - HPF)
- 8) วิธีการหลอมรวมข้อมูลแบบ Ehlers (EF)
- 9) วิธีการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพแบบ Gram-Schmidt (GS)

วิธีการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพในแต่ละวิธีจะมีจุดเด่นและจุดด้อยแตกต่างกัน เช่น ความคมชัดของวัตถุที่ปรากฏบนภาพ การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าความสว่าง ผลกระทบต่อสีสັນของข้อมูลภาพ คุณภาพของลายผิว (texture quality) การรักษาคุณสมบัติเชิงสเปกตรัมของข้อมูลภาพ (Spectral information preservation) การรักษาคุณสมบัติเชิงพื้นที่ของข้อมูลภาพ (Spatial information preservation) ความซับซ้อนในการประมวลผลข้อมูลภาพ หรือผลกระทบต่อความถูกต้องของการจำแนก (Effect on image classification) เป็นต้น

2.2 การประเมินคุณภาพข้อมูลภาพ (Evaluation of Image quality)

การประเมินคุณภาพข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวมีเป้าหมายหลักคือ เพื่อวัดระดับความเหมาะสมและความสอดคล้องของการนำข้อมูลดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานเฉพาะทาง โดยทั่วไปการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพจะพิจารณาจากค่าดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพ (Image quality index) เป็นหลัก โดยไม่นำความต้องการของผู้ใช้งานเฉพาะทางมาพิจารณา ดังนั้น ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องเพื่อคัดเลือกและกำหนดเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพข้อมูล ซึ่งเป็นที่ยอมรับและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ โดยออกแบบสอบถามเพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทาง (ด้านเมือง เกษตรกรรมและป่าไม้) เป็นผู้พิจารณาให้ค่านำหนักที่เหมาะสมสำหรับแต่ละเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพข้อมูล ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้มีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินดังต่อไปนี้

2.2.1 การประเมินคุณภาพด้วยสายตา (Visual judgment)

การประเมินคุณภาพด้วยสายตา เป็นกระบวนการที่นิยมใช้สำหรับการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพเบื้องต้น เนื่องจากผู้ใช้งานสามารถทำการประเมินได้ด้วยตนเองโดยไม่ต้องใช้เครื่องมือหรือการประมวลผลที่ซับซ้อน แต่แนวทางนี้จะอาศัยการวิเคราะห์ด้วยสายตา (Visual analysis) ภายใต้ระบบการมองเห็นของมนุษย์ (Human visual system) เป็นหลัก แม้ว่าเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพนี้จะดูสมเหตุสมผลสำหรับนำข้อมูลภาพไปใช้งาน แต่ผลการประเมินนั้น จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับรู้และการมองเห็นของมนุษย์ที่มีความแตกต่างกัน

ตลอดจน ทักษะ ความชำนาญ และประสบการณ์ของผู้ประเมิน ในการประเมินคุณภาพด้วยสายตา จะอาศัยองค์ประกอบพื้นฐานที่นำมาใช้ในการแปลตีความข้อมูลภาพด้วยสายตา (Fundamental elements of visual image interpretation) ซึ่งจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างข้อมูลภาพ ต้นฉบับ (ข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น) กับข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วย ข้อมูลช่วงคลื่นเดียวขององค์ประกอบพื้นฐานที่ใช้ในการแปลตีความด้วยสายตา ดังต่อไปนี้

- โทนสี (Tone)
- สีสรร (Color)
- ขนาด (Size)
- รูปร่าง (Shape)
- ลายผิว (Texture)
- รูปแบบ (Pattern)
- ที่ตั้งและการร่วมกลุ่ม (Site and Association)

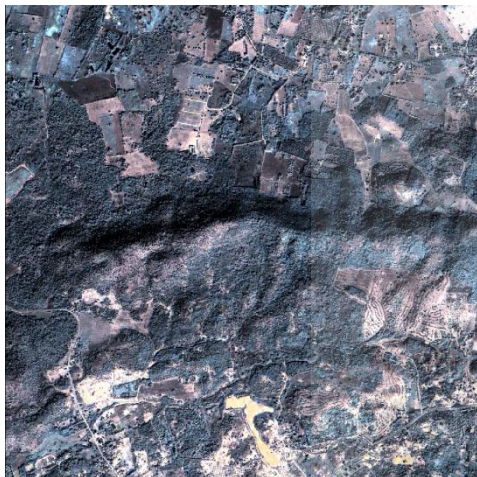
ตัวอย่างผลการประเมินคุณภาพด้วยสายตาโดยผู้วิจัยที่พิจารณาจากภาพสีผสมของ ผลลัพธ์จากการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวที่แตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลต้นฉบับสำหรับการนำไปใช้แปลตีความด้วยสายตาในพื้นที่ต้นแบบทางด้านป่าไม้ (ภาพที่ 1) ซึ่งประกอบด้วยตัวอย่างข้อมูลภาพคุณภาพดี ปานกลางและเลวสำหรับการแปลตีความด้วยสายตา



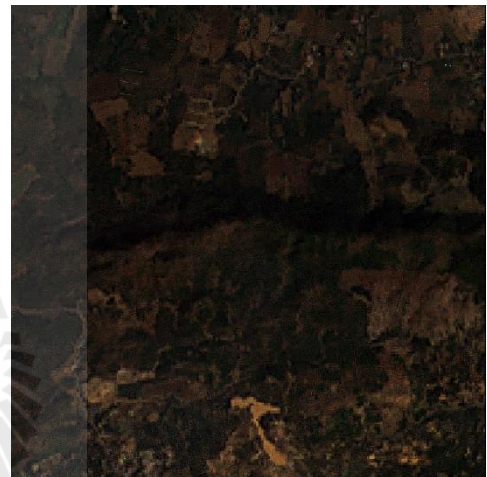
(a) ข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น



(b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี



(c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง



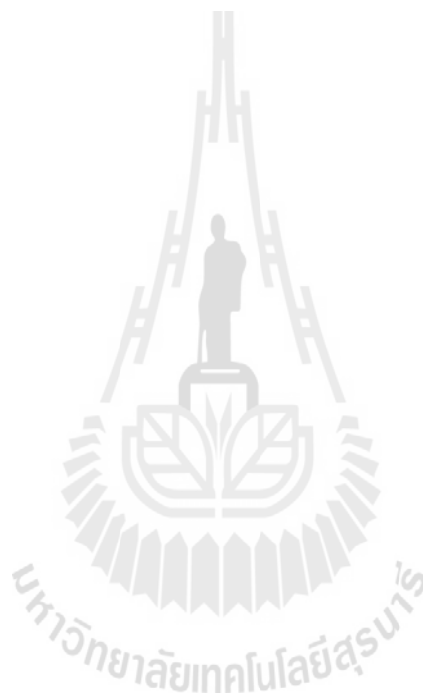
(d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว

ภาพที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลภาพต้นฉบับและข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวโดยวิธีการที่แตกต่างกันจากการประเมินด้วยสายตาโดยผู้วิจัย (a) ข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น (b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี (c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง (d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว

2.2.2 การวิเคราะห์การตรวจจับเส้นขอบ (Edge detection analysis)

เป็นการประเมินค่าทางสถิติของข้อมูลภาพจะใช้วิธีการตรวจจับเส้นขอบ (Edge detection) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งของการเน้นความคมชัดข้อมูลภาพ (image enhancement) โดยอาศัยตัวกรองเชิงพื้นที่ (Spatial filter) 2 รูปแบบ (Sobel และ Laplacian) นำมาปฏิบัติกรกับข้อมูลภาพต้นฉบับแบบช่วงคลื่นเดียวและข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวจากวิธีการต่างๆ และทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) เพื่อใช้วัดค่าความคล้ายคลึงกันสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลต้นฉบับแบบช่วงคลื่นเดียวและข้อมูลภาพที่

ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียว ซึ่งบ่งบอกถึงการรักษาคุณสมบัติเชิงพื้นที่ (Spatial property preservation) ตัวอย่างของการตรวจจับเส้นขอบและผลการประเมินค่าทางสถิติของข้อมูลภาพ (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์) ของข้อมูลภาพต้นฉบับและข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียว โดยวิธีการที่แตกต่างกันสำหรับพื้นที่ต้นแบบทางด้านป่าไม้แสดงไว้ในภาพที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยตัวอย่างข้อมูลภาพที่เก็บรักษาคุณสมบัติเชิงพื้นที่ในระดับดี ปานกลางและเลว





(a) ข้อมูลภาพที่ประมวลผลจากข้อมูลช่วงคลื่นเดียว
(ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 1.00)

(b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี
(ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.89)



(c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง
(ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.57)

(d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว
(ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.02)

ภาพที่ 2 ตัวอย่างของการตรวจจับเส้นขอบและผลการประเมินค่าทางสถิติของข้อมูลภาพ (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์) จากการตรวจจับเส้นขอบกับข้อมูลภาพต้นฉบับ (ข้อมูลภาพช่วงคลื่นเดียว) และข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวโดยวิธีการที่แตกต่างกัน (a) ข้อมูลภาพที่ประมวลผลจากข้อมูลช่วงคลื่นเดียว (b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี (c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง (d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว

2.2.3 การประเมินค่าดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพ (Image Quality indices)

ดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพ เป็นตัวประเมินเชิงปริมาณที่ใช้วัดความเพี้ยน (Distortion) ที่เกิดขึ้นในแต่ละวิธีของการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียว โดยอาศัยการเปรียบเทียบค่าทางสถิติ ที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ระหว่างข้อมูลต้นฉบับ (ข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น) และข้อมูลที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพ

ดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบด้วย

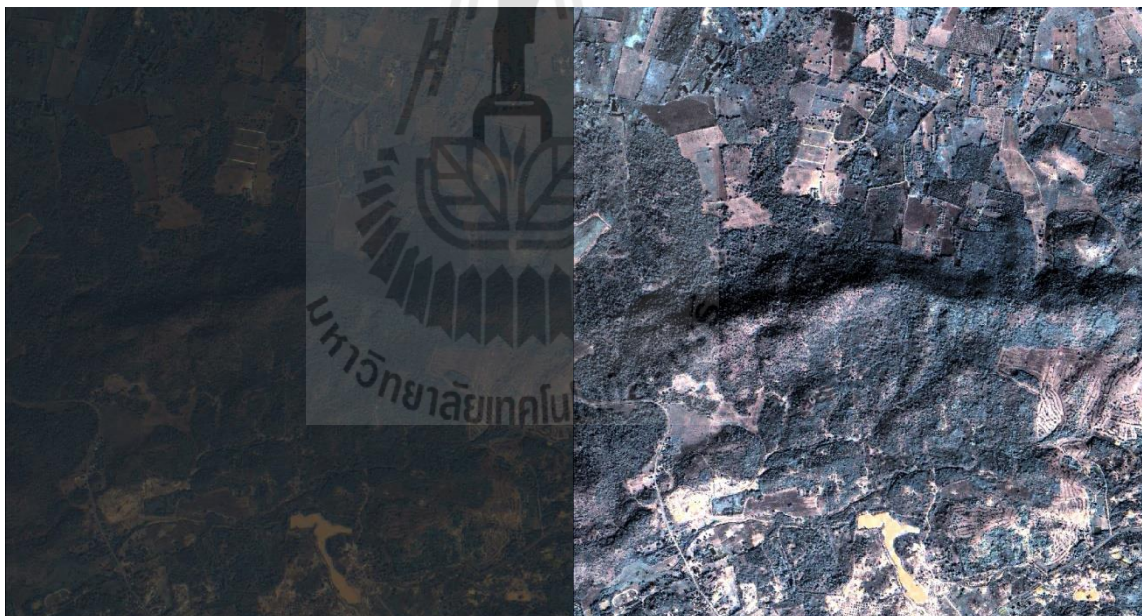
- ความคลาดเคลื่อนรากกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error)
- สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient)
- การเคลื่อนสัมพัทธ์ของค่าเฉลี่ย (Relative shift of the mean)
- ความคลาดเคลื่อนสเปกตรัมเฉลี่ยสัมพัทธ์ (Relative Average Spectral Error)
- ความคลาดเคลื่อนโดยรวมแบบไร้มิติสัมพัทธ์ (Relative dimensionless global error in synthesis – ERGAS)
- การทำแผนที่มุมเชิงสเปกตรัม (Spectral Angle Mapping)
- ดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพสากล (Universal Image Quality Index)

ตัวอย่างผลการประเมิน ที่ได้รับจากดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพสากลระหว่างข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่นและข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพโดย 3 วิธีการในพื้นที่ต้นแบบทางด้านป่าไม้ (ภาพที่ 3) ซึ่งประกอบด้วยตัวอย่างข้อมูลภาพและค่าดัชนีคุณภาพใน 3 ระดับ (ดี ปานกลางและเลว) ที่พิจารณาจากค่าทางสถิติที่วัดได้



(a) ข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น
(ค่าดัชนีคุณภาพเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์)

(b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี
(ค่าดัชนีคุณภาพเท่ากับ 66 เปอร์เซ็นต์)



(c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง
(ค่าดัชนีคุณภาพเท่ากับ 46 เปอร์เซ็นต์)

(d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว
(ค่าดัชนีคุณภาพเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์)

ภาพที่ 3 ตัวอย่างผลการประเมินที่ได้รับจากดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพสากลระหว่างข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่นและข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพโดยวิธีการที่ต่างกันไป (a) ข้อมูลภาพแบบหลายช่วงคลื่น (b) คุณภาพดี (c) คุณภาพปานกลาง (d) คุณภาพเลว

2.2.4 การประเมินคุณภาพค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพ (Effect on classification accuracy)

ในการประเมินคุณภาพค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพ จะพิจารณาจากค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall accuracy) และค่าสัมประสิทธิ์แคปปา (Kappa hat coefficient) ของผลการจำแนกข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพ โดยวิธีการจำแนกแบบไม่กำกับดูแล (Unsupervised classification) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำแนกข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น โดยวิธีการจำแนกแบบไม่กำกับดูแล ข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพ ด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียว ที่ให้ผลการจำแนกที่มีความความถูกต้องโดยรวมสูงจะบ่งชี้ถึงการรักษาคุณสมบัติเชิงสเปกตรัม (Spectral property preservation) ที่สูง

ตัวอย่างข้อมูลภาพต้นฉบับ (ข้อมูลภาพแบบหลายช่วงคลื่น) และข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียว ที่ได้รับจากหลายวิธีการที่แตกต่างกัน และค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall accuracy) ของพื้นที่ต้นแบบทางด้านป่าไม้แสดงไว้ในภาพที่

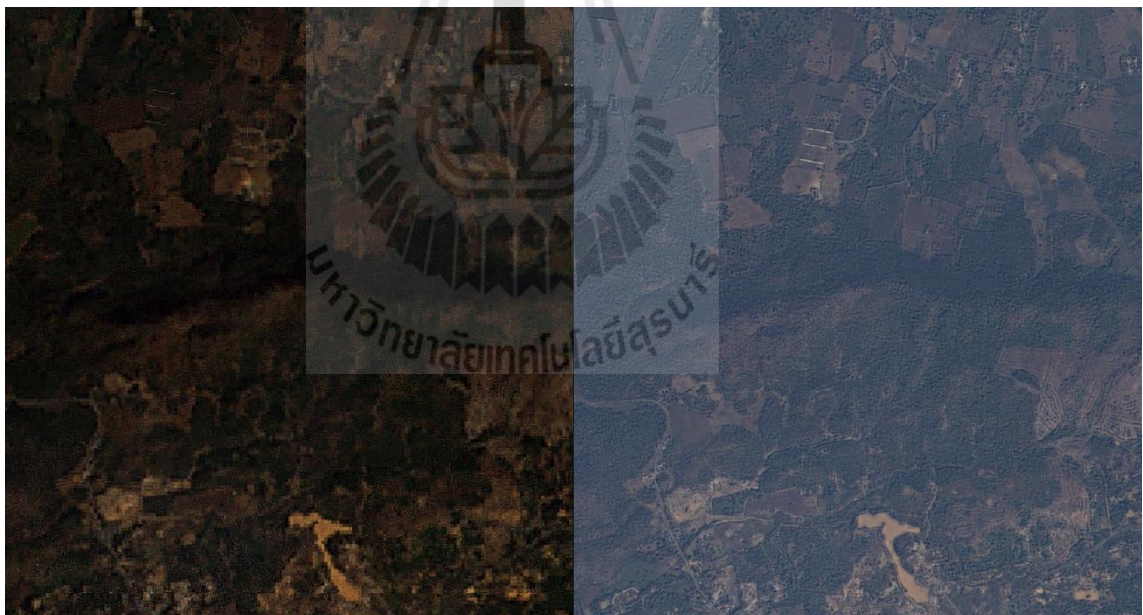
4





(a) ข้อมูลภาพแบบหลายช่วงคลื่น
(ความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลเท่ากับ 100
เปอร์เซ็นต์)

(b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี
(ความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลเท่ากับ 45
เปอร์เซ็นต์)



(c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง
(ความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลเท่ากับ 38
เปอร์เซ็นต์)

(d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว
(ความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลเท่ากับ 26
เปอร์เซ็นต์)

ภาพที่ 4 ตัวอย่างผลการประเมินคุณภาพค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพที่พิจารณาจากค่าความถูกต้องโดยรวม (a) ข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น (b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี (c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง (d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว

3. ข้อมูลผู้ตอบแบบสอบถาม

หน่วยงานผู้ตอบแบบสอบถาม _____

ชื่อ-นามสกุล _____

ตำแหน่ง _____

การประยุกต์ใช้งานข้อมูลภาพดาวเทียม

เกษตรกรรม (Agriculture application)

ป่าไม้ (Forestry application)

เมือง (Urban application)

อื่นๆ (โปรดระบุ) _____

4. การประเมินความต้องการของผู้ใช้งาน

4.1 ภาพรวมผลการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพโดยผู้วิจัย

จากเกณฑ์และตัวอย่างผลการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพ ซึ่งประกอบด้วย (1) การประเมินคุณภาพด้วยสายตา (Visual judgment) (2) การวิเคราะห์การตรวจจับเส้นขอบ (Edge detection analysis) (3) การประเมินค่าดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพ (Image Quality indices) และ (4) การประเมินคุณภาพค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพ (Effect on classification accuracy) ที่นำเสนอโดยผู้วิจัยดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปภาพรวมของข้อมูลเชิงปริมาณและคุณภาพของแต่ละเกณฑ์และวิธีการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวที่แตกต่างกัน ดังแสดงตัวอย่างไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นการพิจารณาจากความรู้ ทักษะ และประสบการณ์ของผู้วิจัยเพียงผู้เดียว

ตารางที่ 1 ตัวอย่างผลการประเมินคุณภาพเทคนิคการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านป่าไม้

วิธีการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพ	การประเมินด้วยสายตา	การวิเคราะห์การตรวจจับเส้นขอบ	การประเมินด้วยค่าดัชนีคุณภาพ	การประเมินด้วยค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อมูล
BT	9	6	6	3
MT	6	5	3	4
PCA	7	5	7	3
IHST	6	7	2	3
MIHST	8	5	9	3
HPF	9	8	8	2
WT	3	0	2	4
EF	7	6	8	4
GS	10	6	9	3

4.2 การประเมินความต้องการของผู้ใช้งาน

จากข้อมูลพื้นฐานและภาพรวมผลการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพโดยผู้วิจัยตั้งอธิบายไว้ข้างต้น ท่านในฐานะเป็นผู้เชี่ยวชาญและเป็นตัวแทนของกลุ่มผู้ใช้งานเฉพาะทาง (ด้านเมือง เกษตรกรรมและป่าไม้) สำหรับการนำข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยวิธีการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวที่แตกต่างกันไปประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสมกับภารกิจของหน่วยงาน ท่านคิดว่า ในการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพตามความต้องการของผู้ใช้งาน ควรมีสัดส่วนค่าน้ำหนักของแต่ละเกณฑ์เป็นอย่างไร? (โปรดระบุสัดส่วนตามความสำคัญของเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพ)

การประเมินคุณภาพด้วยสายตา	สัดส่วน _____ %
การประเมินค่าทางสถิติของข้อมูลภาพ	สัดส่วน _____ %
การประเมินค่าดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพ	สัดส่วน _____ %
การประเมินคุณภาพค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพ	สัดส่วน _____ %
	รวม 100 %

อนึ่ง ค่าน้ำหนักที่ได้รับจากผู้เชี่ยวชาญในแต่ละท่าน จะถูกนำไปประมวลผลเพื่อประเมินหาวิธีการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวที่เหมาะสม สำหรับการประยุกต์ใช้งานเฉพาะทาง (ด้านเมือง เกษตรกรรมและป่าไม้) ต่อไป ด้วยวิธี Simple Additive Weighting (SAW) ที่คำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$A = \sum_j w_j x_{ij}$$

เมื่อ A คือ ผลคะแนนรวมของแต่ละวิธีการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียว

x_{ij} คือ ค่าคะแนนของวิธีการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวแต่ละวิธีที่ได้จากการประเมินคุณภาพโดยผู้วิจัย

w_j คือ ค่าน้ำหนักแต่ละเกณฑ์การประเมินคุณภาพที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญ



การประยุกต์ใช้งานด้านเมือง (Urban application)

แบบสอบถาม เรื่อง การประเมินคุณภาพ การปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยว สำหรับข้อมูลภาพดาวเทียมธีออส (Questionnaire for quality assessing the optimum pan-sharpening method for THEOS satellite imagery)

1. วัตถุประสงค์ของแบบสอบถาม

- เพื่อประเมินความต้องการของกลุ่มผู้ใช้งานเฉพาะทาง (ด้านเมือง เกษตรกรรม และ ป่าไม้) ที่มีต่อข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยวิธีการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยว (Pan-sharpening method) ที่แตกต่างกัน ให้เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานเฉพาะทาง (ด้านเมือง เกษตรกรรมและ ป่าไม้)

2. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยวสำหรับข้อมูลภาพดาวเทียม

2.1 การปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยว (Pan-sharpening method)

การปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยว เป็นกระบวนการเพิ่มความคมชัดของข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น (Multispectral image) ที่มีความละเอียดเชิงสเปกตรัม (spectral resolution) สูง ด้วยข้อมูลภาพช่วงคลื่นเดี่ยว (Panchromatic image) ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ (spatial resolution) สูง ดังนั้น เมื่อนำข้อมูลภาพทั้งสองมาทำการประมวลผลด้วยวิธีการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยวแล้ว จะทำให้ได้ข้อมูลภาพที่มีความละเอียดเชิงสเปกตรัมและเชิงพื้นที่สูง โดยข้อมูลภาพที่ได้รับจากวิธีการนี้จะเรียกว่า ข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยว (Pan-sharpened image)

กระบวนการดังกล่าวมีเป้าหมายหลักคือ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารสนเทศจากข้อมูลภาพ (Information extraction) ซึ่งได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน วิธีการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยวสามารถดำเนินการได้หลายวิธี สำหรับวิธีการที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วย

- 1) วิธีการแปลงแบบ โบรเวย์ (Brovey transformation - BT)
- 2) วิธีการแปลงแบบการคูณ (Multiplicative transformation - MT)
- 3) วิธีการแปลงความเข้ม/สี/การอิ่มตัว (Intensity Hue Saturation transformation - IHST)

- 4) วิธีการตัดแปลงความเข้ม/สีสั่น/การอ้อมตัว (Modified IHS transformation - MIHST)
- 5) วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis - PCA)
- 6) วิธีการแปลงแบบเวฟเล็ต (Wavelet transformation - WT)
- 7) วิธีการแปลงแบบอภัยตัวกรองความถี่สูง (High Pass Filter - HPF)
- 8) วิธีการหลอมรวมข้อมูลแบบ Ehlers (EF)
- 9) วิธีการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพแบบ Gram-Schmidt (GS)

วิธีการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพในแต่ละวิธีจะมีจุดเด่นและจุดด้อยแตกต่างกัน เช่น ความคมชัดของวัตถุที่ปรากฏบนภาพ การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าความสว่าง ผลกระทบต่อสีสั่นของข้อมูลภาพ คุณภาพของลายผิว (texture quality) การรักษาคุณสมบัติเชิงสเปกตรัมของข้อมูลภาพ (Spectral information preservation) การรักษาคุณสมบัติเชิงพื้นที่ของข้อมูลภาพ (Spatial information preservation) ความซับซ้อนในการประมวลผลข้อมูลภาพ หรือผลกระทบต่อความถูกต้องของการจำแนก (Effect on image classification) เป็นต้น

2.2 การประเมินคุณภาพข้อมูลภาพ (Evaluation of Image quality)

การประเมินคุณภาพข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวมีเป้าหมายหลักคือ เพื่อวัดระดับความเหมาะสมและความสอดคล้องของการนำข้อมูลดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานเฉพาะทาง โดยทั่วไปการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพจะพิจารณาจากค่าดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพ (Image quality index) เป็นหลัก โดยไม่นำความต้องการของผู้ใช้งานเฉพาะทางมาพิจารณา ดังนั้น ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องเพื่อคัดเลือกและกำหนดเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพข้อมูลซึ่งเป็นที่ยอมรับและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ โดยออกแบบสอบถามเพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทาง (ด้านเมือง เกษตรกรรมและป่าไม้) เป็นผู้พิจารณาให้คำแนะนำที่เหมาะสมสำหรับแต่ละเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพข้อมูล ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้มีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินดังต่อไปนี้

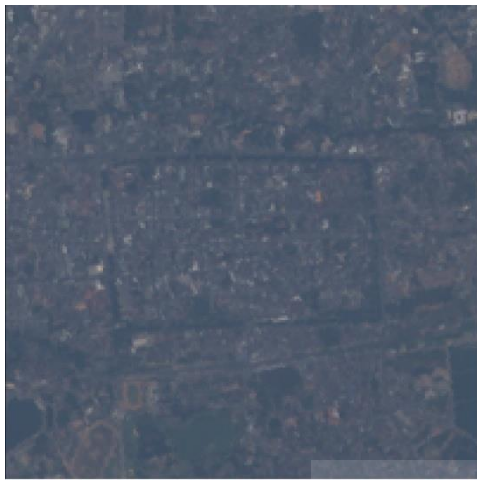
2.2.1 การประเมินคุณภาพด้วยสายตา (Visual judgment)

การประเมินคุณภาพด้วยสายตา เป็นกระบวนการที่นิยมใช้สำหรับการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพเบื้องต้น เนื่องจากผู้ใช้งานสามารถทำการประเมินได้ด้วยตนเองโดยไม่ต้องใช้เครื่องมือหรือการประมวลผลที่ซับซ้อน แต่แนวทางนี้จะอาศัยการวิเคราะห์ด้วยสายตา (Visual analysis) ภายใต้ระบบการมองเห็นของมนุษย์ (Human visual system) เป็นหลัก แม้ว่าเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพนี้จะดูสมเหตุสมผลสำหรับนำข้อมูลภาพไปใช้งาน แต่ผลการประเมิน จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับรู้และการมองเห็นของมนุษย์ที่มีความแตกต่างกัน

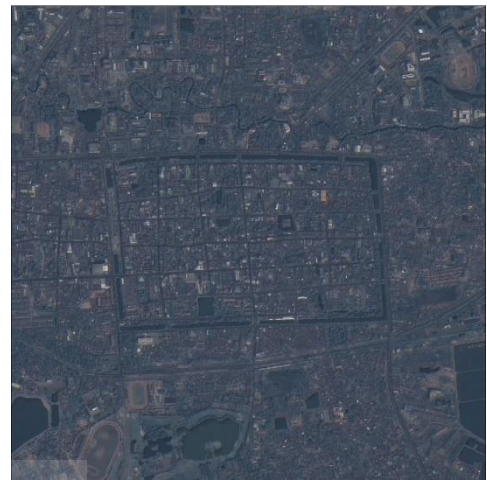
ตลอดจน ทักษะ ความชำนาญ และประสบการณ์ของผู้ประเมิน ในการประเมินคุณภาพด้วยสายตา จะอาศัยองค์ประกอบพื้นฐานที่นำมาใช้ในการแปลตีความข้อมูลภาพด้วยสายตา (Fundamental elements of visual image interpretation) ซึ่งจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างข้อมูลภาพ ต้นฉบับ (ข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น) กับข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วย ข้อมูลช่วงคลื่นเดียวขององค์ประกอบพื้นฐานที่ใช้ในการแปลตีความด้วยสายตา ดังต่อไปนี้

- โทนสี (Tone)
- สีสรร (Color)
- ขนาด (Size)
- รูปร่าง (Shape)
- ลายผิว (Texture)
- รูปแบบ (Pattern)
- ที่ตั้งและการรวมกลุ่ม (Site and Association)

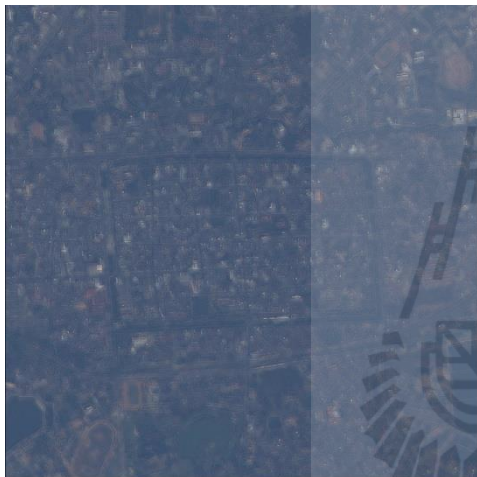
ตัวอย่างผลการประเมินคุณภาพด้วยสายตาโดยผู้วิจัยที่พิจารณาจากภาพสีผสมของ ผลลัพธ์จากการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวที่แตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลต้นฉบับสำหรับการนำไปใช้แปลตีความด้วยสายตาในพื้นที่ต้นแบบทางด้านเมือง (ภาพที่ 1) ซึ่งประกอบด้วยตัวอย่างข้อมูลภาพคุณภาพดี ปานกลางและเลวสำหรับการแปลตีความด้วยสายตา



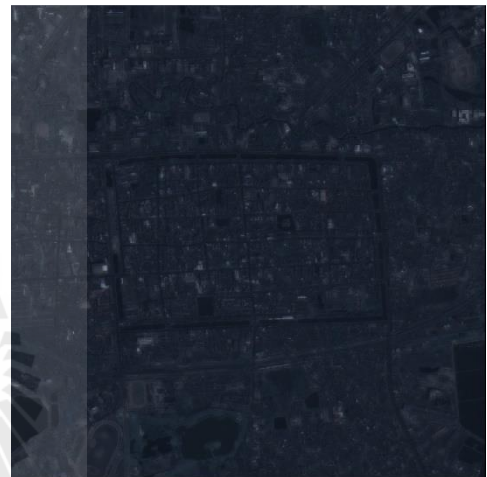
(a) ข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น



(b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี



(c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง



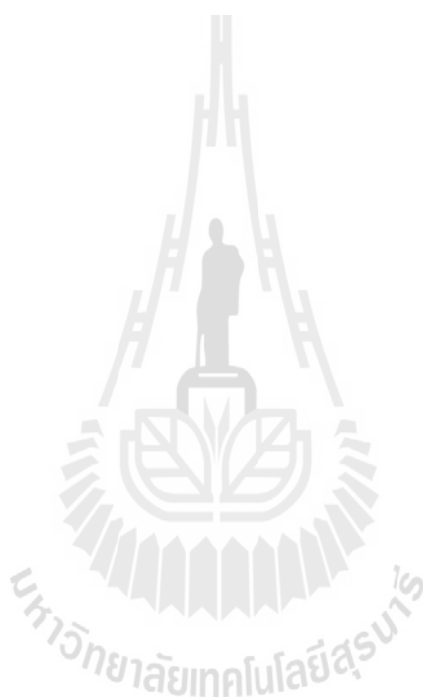
(d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว

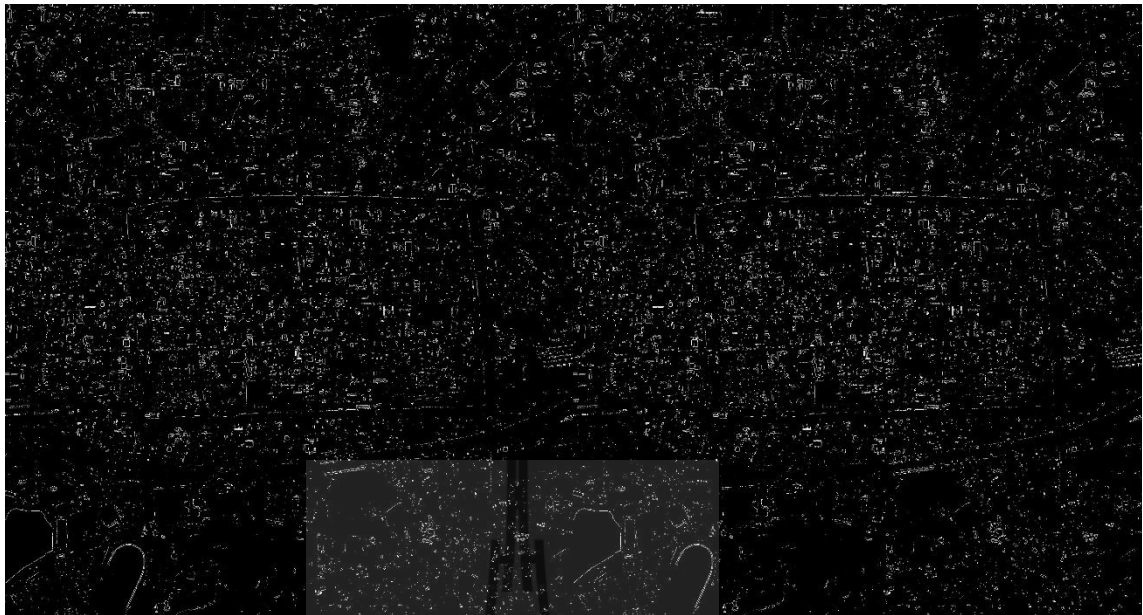
ภาพที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลภาพต้นฉบับและข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวโดยวิธีการที่แตกต่างกันจากการประเมินด้วยสายตาโดยผู้วิจัย (a) ข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น (b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี (c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง (d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว

2.2 การวิเคราะห์การตรวจจับเส้นขอบ (Edge detection analysis)

เป็นการประเมินค่าทางสถิติของข้อมูลภาพจะใช้วิธีการตรวจจับเส้นขอบ (Edge detection) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งของการเน้นความคมชัดข้อมูลภาพ (image enhancement) โดยอาศัยตัวกรองเชิงพื้นที่ (Spatial filter) 2 รูปแบบ (Sobel และ Laplacian) นำมาปฏิบัติการกับข้อมูลภาพต้นฉบับแบบช่วงคลื่นเดียวและข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียว จากวิธีการต่างๆ และทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) เพื่อใช้วัดค่าความคล้ายคลึงกันสัมพันธ์ ระหว่างข้อมูลต้นฉบับแบบช่วงคลื่นเดียวและข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียว ซึ่งบ่งบอกถึงการรักษาคูสมบัติเชิงพื้นที่ (Spatial

property preservation) ตัวอย่างผลของการตรวจจับเส้นขอบ และผลการประเมินค่าทางสถิติของ ข้อมูลภาพ (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์) ของข้อมูลภาพต้นฉบับและข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุง ความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียว โดยวิธีการที่แตกต่างกันสำหรับพื้นที่ต้นแบบทางด้าน เมืองเสดงไว้ในภาพที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยตัวอย่างข้อมูลภาพที่เก็บรักษาคุณสมบัติเชิงพื้นที่ในระดับ ดี ปานกลางและเลว





(a) ข้อมูลภาพที่ประมวลผลจากข้อมูลช่วงคลื่นเดียว
(ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 1.00)

(b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี
(ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.90)



(c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง
(ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.62)

(d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว
(ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.02)

ภาพที่ 2 ตัวอย่างของการตรวจจับเส้นขอบและผลการประเมินค่าทางสถิติของข้อมูลภาพ (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์) จากการตรวจจับเส้นขอบกับข้อมูลภาพต้นฉบับ (ข้อมูลภาพช่วงคลื่นเดียว) และข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวโดยวิธีการที่แตกต่างกัน (a) ข้อมูลภาพที่ประมวลผลจากข้อมูลช่วงคลื่นเดียว (b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี (c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง (d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว

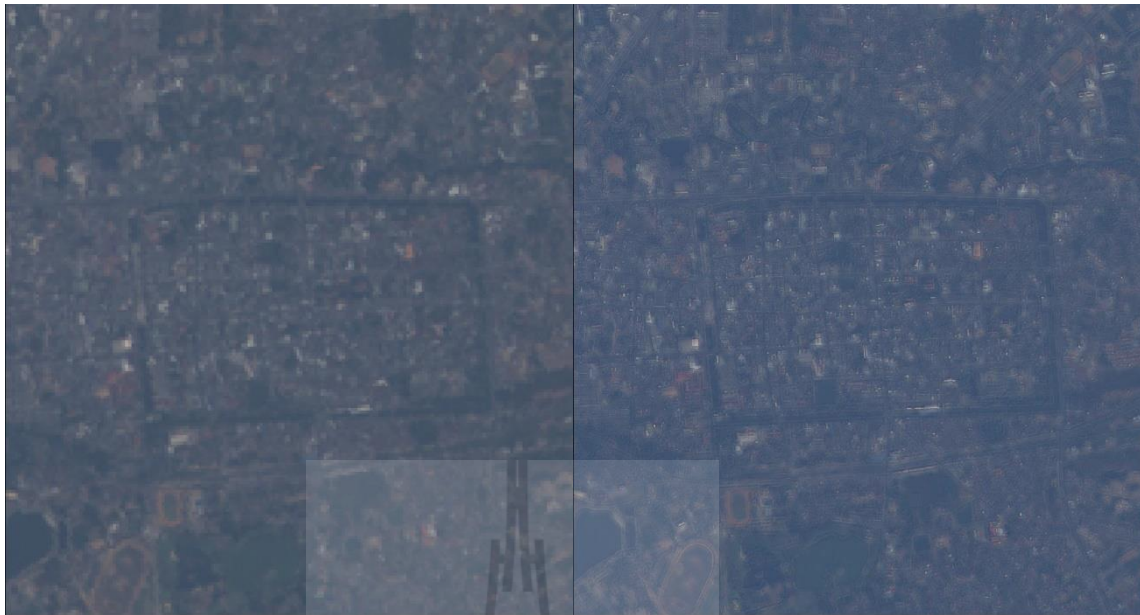
2.2.3 การประเมินค่าดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพ (Image Quality indices)

ดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพ เป็นตัวประเมินเชิงปริมาณที่ใช้วัดความเพี้ยน (Distortion) ที่เกิดขึ้นในแต่ละวิธีของการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียว โดยอาศัยการเปรียบเทียบค่าทางสถิติที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ระหว่างข้อมูลต้นฉบับ (ข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น) และข้อมูลที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพ

ดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบด้วย

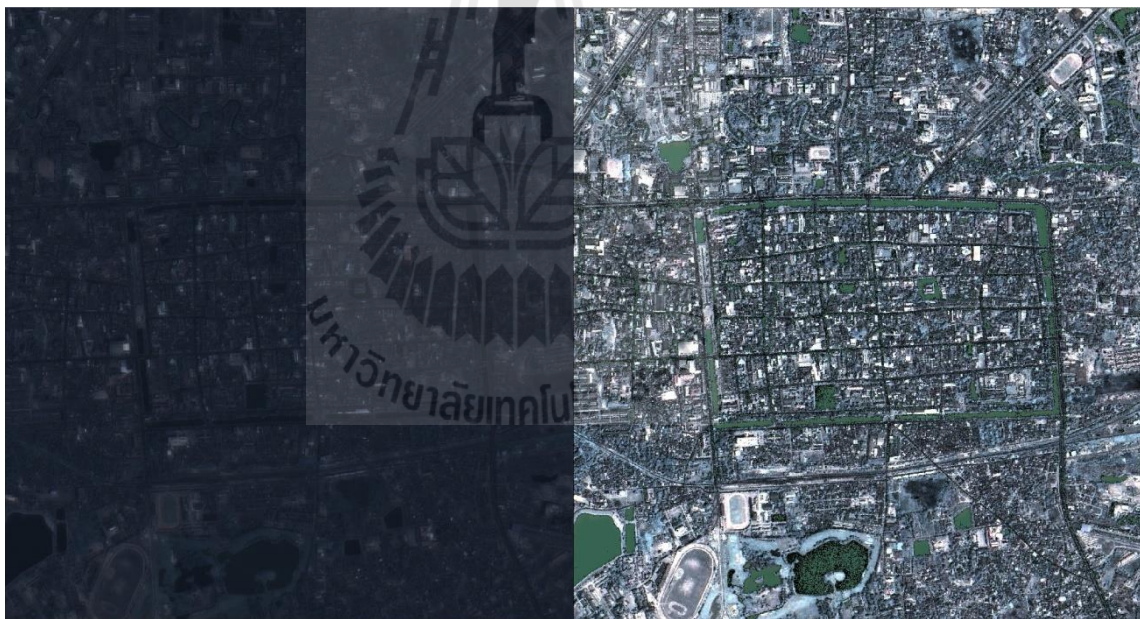
- ความคลาดเคลื่อนรากกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error)
- สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient)
- การเคลื่อนสัมพัทธ์ของค่าเฉลี่ย (Relative shift of the mean)
- ความคลาดเคลื่อนสเปกตรัมเฉลี่ยสัมพัทธ์ (Relative Average Spectral Error)
- ความคลาดเคลื่อนโดยรวมแบบไร้มิติสัมพัทธ์ (Relative dimensionless global error in synthesis – ERGAS)
- การทำแผนที่มุมเชิงสเปกตรัม (Spectral Angle Mapping)
- ดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพสากล (Universal Image Quality Index)

ตัวอย่างผลการประเมินที่ได้รับจากดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพสากลระหว่างข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่นและข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพโดย 3 วิธีการในพื้นที่ต้นแบบทางด้านเมือง (ภาพที่ 3) ซึ่งประกอบด้วยตัวอย่างข้อมูลภาพและค่าดัชนีคุณภาพใน 3 ระดับ (ดี ปานกลางและเลว) ที่พิจารณาจากค่าทางสถิติที่วัดได้



(a) ข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น
(ค่าดัชนีคุณภาพเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์)

(b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี
(ค่าดัชนีคุณภาพเท่ากับ 6 เปอร์เซ็นต์)



(c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง
(ค่าดัชนีคุณภาพเท่ากับ 42 เปอร์เซ็นต์)

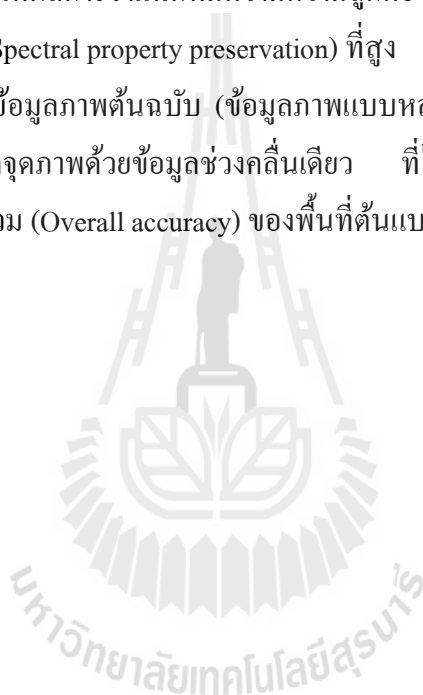
(d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว
(ค่าดัชนีคุณภาพเท่ากับ 8 เปอร์เซ็นต์)

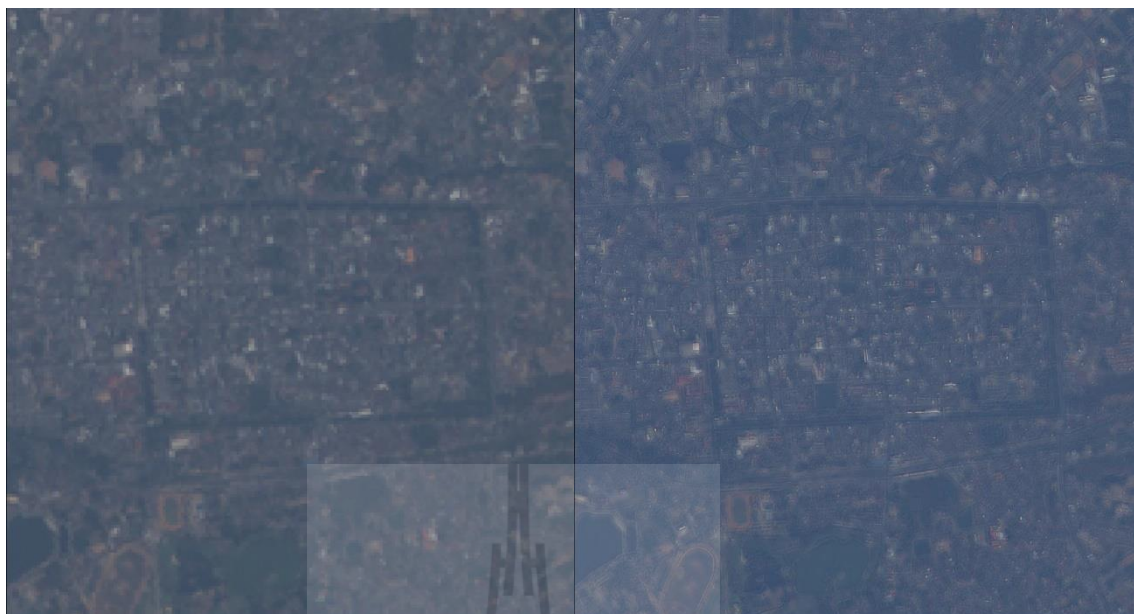
ภาพที่ 3 ตัวอย่างผลการประเมินที่ได้รับจากดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพสากลระหว่างข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่นและข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพโดยวิธีการที่แตกต่างกัน (a) ข้อมูลภาพแบบหลายช่วงคลื่น (b) คุณภาพดี (c) คุณภาพปานกลาง (d) คุณภาพเลว

2.2.4 การประเมินคุณภาพค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพ (Effect on classification accuracy)

ในการประเมินคุณภาพค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพ จะพิจารณาจากค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall accuracy) และค่าสัมประสิทธิ์แคปปา ($Kappa\ hat\ coefficient$) ของผลการจำแนกข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพ โดยวิธีการจำแนกแบบไม่กำกับดูแล (Unsupervised classification) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำแนกข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น โดยวิธีการจำแนกแบบไม่กำกับดูแล ข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพ ด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวที่ให้ผลการจำแนกที่มีความความถูกต้องโดยรวมสูง จะบ่งชี้ถึงการรักษาคุณสมบัติเชิงสเปกตรัม (Spectral property preservation) ที่สูง

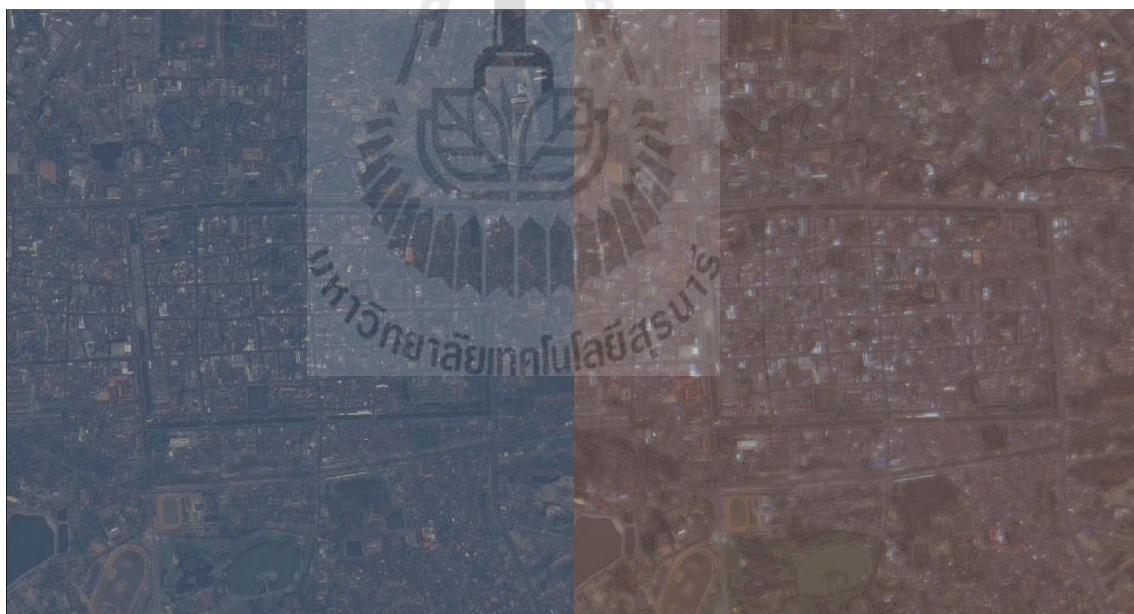
ตัวอย่างข้อมูลภาพต้นฉบับ (ข้อมูลภาพแบบหลายช่วงคลื่น) และข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียว ที่ได้รับจากหลายวิธีการที่แตกต่างกัน และค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall accuracy) ของพื้นที่ต้นแบบทางด้านเมืองแสดงไว้ในภาพที่ 4





(a) ข้อมูลภาพแบบหลายช่วงคลื่น
(ความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลเท่ากับ 100
เปอร์เซ็นต์)

(b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี
(ความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลเท่ากับ 65
เปอร์เซ็นต์)



(c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง
(ความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลเท่ากับ 36
เปอร์เซ็นต์)

(d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว
(ความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลเท่ากับ 20
เปอร์เซ็นต์)

ภาพที่ 4 ตัวอย่างผลการประเมินคุณภาพค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพที่พิจารณาจากค่าความถูกต้องโดยรวม (a) ข้อมูลภาพหลายช่วงคลื่น (b) ข้อมูลภาพคุณภาพดี (c) ข้อมูลภาพคุณภาพปานกลาง (d) ข้อมูลภาพคุณภาพเลว

3. ข้อมูลผู้ตอบแบบสอบถาม

หน่วยงานผู้ตอบแบบสอบถาม _____

ชื่อ-นามสกุล _____

ตำแหน่ง _____

การประยุกต์ใช้งานข้อมูลภาพดาวเทียม

เกษตรกรรม (Agriculture application)

ป่าไม้ (Forestry application)

เมือง (Urban application)

อื่นๆ (โปรดระบุ) _____

4. การประเมินความต้องการของผู้ใช้งาน

4.1 ภาพรวมผลการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพโดยผู้วิจัย

จากเกณฑ์และตัวอย่างผลการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพ ซึ่งประกอบด้วย (1) การประเมินคุณภาพด้วยสายตา (Visual judgment) (2) การวิเคราะห์การตรวจจับเส้นขอบ (Edge detection analysis) (3) การประเมินค่าดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพ (Image Quality indices) และ (4) การประเมินคุณภาพค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพ (Effect on classification accuracy) ที่นำเสนอโดยผู้วิจัยดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปภาพรวมของข้อมูลเชิงปริมาณและคุณภาพของแต่ละเกณฑ์และวิธีการปรับปรุงความละเอียดจุดภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดี่ยวที่แตกต่างกัน ดังแสดงตัวอย่างไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นการพิจารณาจากความรู้ ทักษะ และประสบการณ์ของผู้วิจัยเพียงผู้เดียว

ตารางที่ 1 ตัวอย่างผลการประเมินคุณภาพเทคนิคการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านเมือง

วิธีการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพ	การประเมินด้วยสายตา	การวิเคราะห์การตรวจจับเส้นขอบ	การประเมินด้วยค่าดัชนีคุณภาพ	การประเมินด้วยค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อมูล
BT	8	8	7	5
MT	3	7	3	5
PCA	5	0	7	2
IHST	6	7	2	3
MIHST	6	7	9	4
HPF	7	8	8	5
WT	3	0	2	4
EF	5	6	9	6
GS	8	8	7	5

4.2 การประเมินความต้องการของผู้ใช้งาน

จากข้อมูลพื้นฐานและภาพรวมผลการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพโดยผู้วิจัย ดังอธิบายไว้ข้างต้น ท่านในฐานะเป็นผู้เชี่ยวชาญและเป็นตัวแทนของกลุ่มผู้ใช้งานเฉพาะทาง (ด้านเมือง เกษตรกรรมและป่าไม้) สำหรับการนำข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยวิธีการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวที่แตกต่างกันไปประยุกต์ใช้งาน ให้เหมาะสมกับภารกิจของหน่วยงาน ท่านคิดว่า ในการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพตามความต้องการของผู้ใช้งาน ควรมีสัดส่วนค่าน้ำหนักของแต่ละเกณฑ์เป็นอย่างไร? (โปรดระบุสัดส่วนตามความสำคัญของเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพข้อมูลภาพ)

การประเมินคุณภาพด้วยสายตา	สัดส่วน _____ %
การประเมินค่าทางสถิติของข้อมูลภาพ	สัดส่วน _____ %
การประเมินค่าดัชนีคุณภาพข้อมูลภาพ	สัดส่วน _____ %
การประเมินคุณภาพค่าความถูกต้องของการจำแนกข้อมูลภาพ	สัดส่วน _____ %
	รวม 100 %

อนึ่ง ค่าน้ำหนักที่ได้รับจากผู้เชี่ยวชาญในแต่ละท่าน จะถูกนำไปประมวลผลเพื่อใช้ประเมินหาวิธีการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวที่เหมาะสม สำหรับการประยุกต์ใช้งานเฉพาะทาง (ด้านเมือง เกษตรกรรมและป่าไม้) ต่อไป ด้วยวิธี Simple Additive Weighting (SAW) ที่คำนวณดังสมการต่อไปนี้

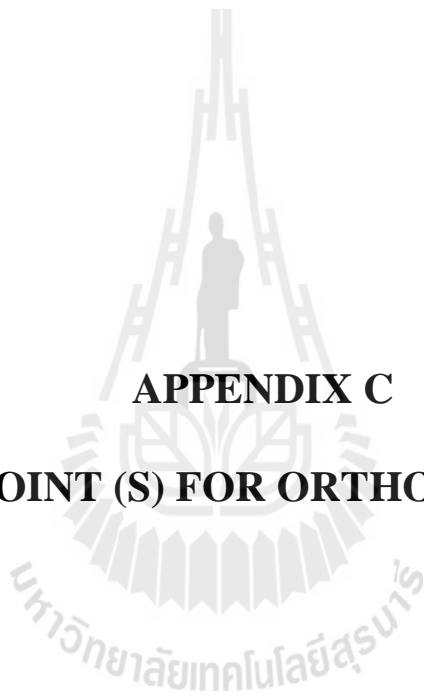
$$A = \sum_j w_j x_{ij}$$

เมื่อ A คือ ผลคะแนนรวมของแต่ละวิธีการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียว

x_{ij} คือ ค่าคะแนนของวิธีการปรับปรุงความละเอียดคุณภาพด้วยข้อมูลช่วงคลื่นเดียวแต่ละวิธีที่ได้จากการประเมินคุณภาพโดยผู้วิจัย

w_j คือ ค่าน้ำหนักแต่ละเกณฑ์การประเมินคุณภาพที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญ





APPENDIX C

CONTROL POINT (S) FOR ORTHORECTIFICATION

C.1 Control points and their residuals for MS1 scene

ID	Easting (E)	Northing (N)	Height (H)	Image X (X)	Image Y (Y)	rE	rN	rH	rX	rY
1	748359.76	1681239.79	107.00	344.0625	98.4375	0.0203	0.0303	0.0303	-0.1007	0.2901
2	741653.63	1651345.23	180.00	330.5938	2223.8438	-0.0031	-0.0251	-0.0251	-0.0139	-0.2137
3	739328.12	1630536.68	173.00	468.1875	3678.3125	0.0210	-0.0382	-0.0382	-0.2200	-0.2929
4	729047.41	1603135.51	159.00	198.0313	5667.5938	0.0288	0.0373	0.0373	-0.1590	0.3620
5	831221.41	1663556.15	181.00	5716.5938	466.5938	0.0173	0.0235	0.0235	-0.0923	0.2355
6	826722.34	1640338.13	257.00	5750.3438	2108.9688	-0.0273	0.0008	0.0008	0.2133	-0.0305
7	819946.37	1624488.00	235.00	5545.9375	3267.1875	0.0196	-0.0360	-0.0360	-0.2227	-0.3040
8	815493.31	1590221.20	437.00	5731.9375	5669.0625	0.0164	0.0289	0.0289	-0.0749	0.2761
9	766319.32	1618202.07	346.02	2314.0625	4252.6875	-0.0684	-0.0149	-0.0149	0.5033	-0.2172
10	784478.15	1646337.93	243.03	3060.4375	2131.1875	-0.0244	-0.0066	-0.0066	0.1768	-0.0896

Note: E, N, and H unit in meters and X and Y unit in pixels

C.2 Control points and their residuals for PAN1 scene

ID	Easting (E)	Northing (N)	Height (H)	Image X (X)	Image Y (Y)	rE	rN	rH	rX	rY
1	770283.70	1626718.08	302.00	1268.6250	854.6250	-0.1564	0.2770	-0.1951	0.2864	0.3281
2	769484.93	1619711.99	348.00	1649.1875	4287.6875	-0.0850	-0.0698	0.0375	0.0931	-0.1086
3	767987.45	1614986.31	361.00	1401.9375	6668.3125	0.0421	-0.1694	0.1138	-0.1099	-0.2062
4	767939.48	1605356.12	405.00	2474.3750	11308.8750	0.2505	0.1156	-0.0489	-0.2782	0.1869
5	787778.57	1624327.73	343.00	10669.8438	754.0313	0.3826	0.2616	-0.1069	-0.4154	0.3972
6	786204.60	1615979.20	442.00	10798.9063	4893.4688	-0.1673	-0.4619	0.2766	0.0732	-0.6201
7	786843.73	1610053.00	480.00	11807.9688	7698.9063	-0.2990	0.2465	-0.2199	0.4753	0.2701
8	783554.76	1601908.06	456.00	11011.3750	11847.1250	0.0592	0.0169	-0.0003	-0.0855	0.0298
9	776249.66	1619535.83	434.00	5205.1250	3894.1250	0.0445	-0.3455	0.2325	-0.1713	-0.4346
10	773852.94	1608858.41	411.00	5164.8125	9198.4375	-0.0708	0.1288	-0.0930	0.1323	0.1596

Note: E, N, and H unit in meters and X and Y unit in pixels

C.3 Control points and their residuals for MS2 scene

ID	Easting (E)	Northing (N)	Height (H)	Image X (X)	Image Y (Y)	rE	rN	rH	rX	rY
1	793665.93	1693517.96	206.43	340.6563	449.5313	0.0062	-0.0062	-0.0031	-0.0571	-0.0459
2	793146.78	1674728.93	252.15	558.8750	1746.3750	-0.0311	0.0262	0.0133	0.2868	0.1892
3	787718.71	1644167.84	258.10	628.3750	3902.3750	0.0364	0.0090	-0.0016	-0.2626	0.1232
4	778077.13	1619233.37	415.71	357.0625	5713.4375	-0.0016	-0.0072	-0.0024	0.0022	-0.0633
5	874315.01	1687422.48	155.00	5477.1875	70.4375	-0.0326	-0.0190	-0.0130	0.2216	-0.2024
6	868310.16	1666581.26	202.00	5379.8125	1561.4375	0.0460	0.0488	0.0245	-0.2766	0.4692
7	860529.53	1635127.93	253.00	5313.3750	3800.6250	-0.0125	0.0009	-0.0026	0.0990	-0.0082
8	849538.97	1611801.97	209.00	4936.6875	5512.9375	-0.0183	0.0014	-0.0033	0.1413	-0.0121
9	828572.46	1660348.34	185.00	2972.3750	2384.6250	0.0191	-0.0568	-0.0172	-0.2404	-0.4602
10	823743.93	1632772.20	209.00	3039.4375	4327.8125	-0.0105	0.0030	0.0004	0.0874	0.0139

Note: E, N, and H unit in meters and X and Y unit in pixels

C.4 Control points and their residuals for PAN2 scene

ID	Easting (E)	Northing (N)	Height (H)	Image X (X)	Image Y (Y)	rE	rN	rH	rX	rY
1	820865.78	1667250.69	190.87	866.6875	341.1875	-0.1858	-0.1949	-0.0628	-0.0264	-0.0965
2	820072.54	1660461.28	193.94	1211.4688	3666.4688	-0.0014	-0.0853	-0.0277	0.1980	-0.2786
3	817247.68	1652640.10	197.88	598.6875	7624.0625	0.0691	0.2631	0.0864	-0.0235	0.3339
4	814964.29	1645471.11	222.09	202.9375	11232.1875	-0.4909	-0.2568	-0.0839	0.5588	-0.4112
5	840465.87	1664822.73	176.99	11487.7813	153.1563	-0.3267	-0.2960	-0.1230	0.3468	-0.4152
6	836377.72	1657983.00	175.01	10092.8125	3728.0625	0.0735	0.3699	0.1219	-0.0002	0.1089
7	835102.71	1650326.32	211.12	10283.6875	7497.1875	0.0217	0.0823	0.0279	-0.1744	-0.3558
8	834638.60	1642198.71	224.96	10962.6875	11440.8125	0.0815	-0.3103	-0.0910	0.0087	0.4627
9	827899.00	1658359.02	183.24	5579.1563	4134.2813	0.6187	0.1722	0.0826	-0.7624	0.3097
10	825570.54	1649886.49	233.20	5306.4375	8368.0625	0.1413	0.2554	0.0886	-0.1124	0.3355

Note: E, N, and H unit in meters and X and Y unit in pixels



APPENDIX D
DETAILS OF CLASSIFICATION ACCURACY
ASSESSMENT

D.1 Results of accuracy assessment in agriculture testing area 1 (A1)

Method	Class Name	Reference	Classified	Correct	Producer Accuracy	User Accuracy	Conditional Kappa
BT	1	97	71	43	44.33%	60.56%	0.2192
	2	54	34	7	12.96%	20.59%	0.0961
	3	44	78	25	56.82%	32.05%	0.1238
	4	1	13	1	100.00%	7.69%	0.0722
MT	1	97	59	42	43.30%	71.19%	0.4295
	2	54	72	22	40.74%	30.56%	0.0415
	3	44	55	13	29.55%	23.64%	0.0153
	4	1	10	1	100.00%	10.00%	0.0954
PCA	1	97	62	40	41.24%	64.52%	0.2975
	2	54	84	27	50.00%	32.14%	0.0634
	3	44	38	10	22.73%	26.32%	0.0499
	4	1	12	1	100.00%	8.33%	0.0786
IHST	1	97	110	57	58.76%	51.82%	0.0461
	2	54	28	6	11.11%	21.43%	0.0845
	3	44	56	12	27.27%	21.43%	0.0132
	4	1	1	0	0.00%	0.00%	0.0051
MIHST	1	97	129	72	74.23%	55.81%	0.1252
	2	54	29	6	11.11%	20.69%	0.0947
	3	44	21	9	20.45%	42.86%	0.2632
	4	1	17	1	100.00%	5.88%	0.0540
HPF	1	97	107	57	58.76%	53.27%	0.0749
	2	54	25	7	12.96%	28.00%	0.0062
	3	44	52	13	29.55%	25.00%	0.0329
	4	1	12	1	100.00%	8.33%	0.0786
WT	1	97	127	68	70.10%	53.54%	0.0803
	2	54	19	9	16.67%	47.37%	0.2735
	3	44	41	10	22.73%	24.39%	0.0250
	4	1	9	1	100.00%	11.11%	0.1066
EF	1	97	117	65	67.01%	55.56%	0.1201
	2	54	43	17	31.48%	39.53%	0.1654
	3	44	26	3	6.82%	11.54%	0.1407
	4	1	10	1	100.00%	10.00%	0.0954
GS	1	97	91	51	52.58%	56.04%	0.1298
	2	54	49	17	31.48%	34.69%	0.0986
	3	44	46	9	20.45%	19.57%	0.0372
	4	1	10	1	100.00%	10.00%	0.0954

Note: Class Name 1, 2, 3, and 4 are urban and built-up areas, filed crops, perennial trees and orchard, and water bodies, respectively.

D.2 Results of accuracy assessment in agriculture testing area 2 (A2)

Method	Class Name	Reference	Classified	Correct	Producer Accuracy	User Accuracy	Conditional Kappa
BT	1	118	146	104	88.14%	71.23%	0.2771
	2	19	16	14	73.68%	87.50%	0.8616
	3	57	34	19	33.33%	55.88%	0.3779
	4	2	0	0	0.00%	0.00%	0.0000
MT	1	118	157	107	90.68%	68.15%	0.1997
	2	19	14	13	68.42%	92.86%	0.9209
	3	57	25	13	22.81%	52.00%	0.3232
	4	2	0	0	0.00%	0.00%	0.0000
PCA	1	118	149	104	88.14%	69.80%	0.2411
	2	19	15	13	68.42%	86.67%	0.8524
	3	57	32	17	29.82%	53.13%	0.3390
	4	2	0	0	0.00%	0.00%	0.0000
IHST	1	118	167	111	94.07%	66.47%	0.1574
	2	19	16	14	73.68%	87.50%	0.8616
	3	57	13	6	10.53%	46.15%	0.2407
	4	2	0	0	0	0	0.0000
MIHST	1	118	122	89	75.42%	72.95%	0.3203
	2	19	20	13	68.42%	65.00%	0.6124
	3	57	54	26	45.61%	48.15%	0.2689
	4	2	0	0	0	0	0.0000
HPF	1	118	162	111	94.07%	68.52%	0.2089
	2	19	16	14	73.68%	87.50%	0.8616
	3	57	18	11	19.30%	61.11%	0.4516
	4	2	0	0	0	0	0.0000
WT	1	118	156	105	88.98%	67.31%	0.1785
	2	19	17	13	68.42%	76.47%	0.7394
	3	57	23	9	15.79%	39.13%	0.1417
	4	2	0	0	0	0	0.0000
EF	1	118	171	113	95.76%	66.08%	0.1477
	2	19	14	13	68.42%	92.86%	0.9209
	3	57	11	6	10.53%	54.55%	0.3591
	4	2	0	0	0	0	0.0000
GS	1	118	152	105	88.98%	69.08%	0.2230
	2	19	19	14	73.68%	73.68%	0.7086
	3	57	25	14	24.56%	56.00%	0.3796
	4	2	0	0	0	0	0.0000

Note: Class Name 1, 2, 3, and 4 are field crops, perennial trees and orchard, horticulture, and water bodies, respectively.

D.3 Results of accuracy assessment in forestry testing area 1 (F1)

Method	Class Name	Reference	Classified	Correct	Producer Accuracy	User Accuracy	Conditional Kappa
BT	1	90	126	74	82.22%	58.73%	0.2369
	2	41	26	8	19.51%	30.77%	0.1246
	3	64	36	18	28.13%	50.00%	0.2576
	4	1	8	1	100.00%	14.29%	0.1385
MT	1	90	110	73	81.11%	66.36%	0.3780
	2	41	39	14	34.15%	35.90%	0.1894
	3	64	42	19	29.69%	45.24%	0.1869
	4	1	5	1	100.00%	25.00%	0.2462
PCA	1	90	142	78	86.67%	54.93%	0.1666
	2	41	40	14	34.15%	35.00%	0.1781
	3	64	6	0	0.00%	0.00%	0.4848
	4	1	8	1	100.00%	14.29%	0.1385
IHST	1	90	148	84	93.33%	56.76%	0.2004
	2	41	29	11	26.83%	37.93%	0.2151
	3	64	7	2	3.13%	28.57%	0.0606
	4	1	12	1	100.00%	9.09%	0.0862
MIHST	1	90	139	81	90.00%	58.27%	0.2285
	2	41	15	5	12.20%	33.33%	0.1570
	3	64	34	14	21.88%	41.18%	0.1266
	4	1	8	1	100.00%	14.29%	0.1385
HPF	1	90	146	83	92.22%	56.85%	0.2021
	2	41	17	8	19.51%	47.06%	0.3306
	3	64	26	12	18.75%	46.15%	0.2005
	4	1	7	1	100.00%	16.67%	0.1624
WT	1	90	143	83	92.22%	58.04%	0.2242
	2	41	18	5	12.20%	27.78%	0.0867
	3	64	29	18	28.13%	62.07%	0.4368
	4	1	6	1	100.00%	20.00%	0.1959
EF	1	90	121	71	78.89%	58.68%	0.2359
	2	41	7	3	7.32%	42.86%	0.2774
	3	64	60	26	40.63%	43.33%	0.1586
	4	1	8	1	100.00%	14.29%	0.1385
GS	1	90	135	76	84.44%	56.30%	0.1919
	2	41	19	10	24.39%	52.63%	0.4010
	3	64	33	13	20.31%	39.39%	0.1001
	4	1	9	1	100.00%	12.50%	0.1205

Note: Class Name 1, 2, 3, and 4 are field crops, perennial trees and orchard, forest land, and water

bodies, respectively.

D.4 Results of accuracy assessment in forestry testing area 2 (F2)

Method	Class Name	Reference	Classified	Correct	Producer Accuracy	User Accuracy	Conditional Kappa
BT	1	140	158	125	89.29%	79.11%	0.2690
	2	48	23	17	35.42%	73.91%	0.6545
	3	8	15	1	12.50%	6.67%	0.0270
MT	1	140	151	116	82.86%	76.82%	0.1887
	2	48	20	11	22.92%	55.00%	0.4041
	3	8	25	1	12.50%	4.00%	0.0009
PCA	1	140	151	116	82.86%	76.82%	0.1887
	2	48	20	11	22.92%	55.00%	0.4041
	3	8	25	1	12.50%	4.00%	0.0009
IHST	1	140	139	114	81.43%	82.01%	0.3705
	2	48	45	20	41.67%	44.44%	0.2643
	3	8	12	0	0.00%	0.00%	0.0426
MIHST	1	140	151	119	85.00%	78.81%	0.2583
	2	48	18	11	22.92%	61.11%	0.4850
	3	8	27	2	25.00%	7.41%	0.0347
HPF	1	140	135	110	78.57%	81.48%	0.3519
	2	48	50	25	52.08%	50.00%	0.3378
	3	8	11	1	12.50%	9.09%	0.0522
WT	1	140	132	112	80.00%	84.85%	0.4697
	2	48	50	28	58.33%	56.00%	0.4173
	3	8	14	2	25.00%	14.29%	0.1064
EF	1	140	138	112	80.00%	81.16%	0.3406
	2	48	40	20	41.67%	50.00%	0.3378
	3	8	18	1	12.50%	5.56%	0.0154
GS	1	140	132	108	77.14%	81.82%	0.3636
	2	48	42	22	45.83%	52.38%	0.3694
	3	8	22	1	12.50%	4.55%	0.0048

Note: Class Name 1, 2, and 3 are field crops, perennial trees and orchard, and forest land, respectively.

D.5 Results of accuracy assessment in urban testing area 1 (U1)

Method	Class Name	Reference	Classified	Correct	Producer Accuracy	User Accuracy	Conditional Kappa
BT	1	13	37	6	46.15%	16.22%	0.1026
	2	167	129	120	71.86%	93.02%	0.5285
	3	16	30	13	81.25%	43.33%	0.3830
MT	1	13	36	8	61.54%	22.22%	0.1670
	2	167	148	137	82.04%	92.57%	0.4977
	3	16	12	10	62.50%	83.33%	0.8185
PCA	1	13	80	11	84.62%	13.75%	0.0762
	2	167	96	91	54.49%	94.79%	0.6480
	3	16	20	8	50.00%	40.00%	0.3467
IHST	1	13	136	10	76.92%	7.35%	0.0077
	2	167	29	27	16.17%	93.10%	0.5339
	3	16	31	12	75.00%	38.71%	0.3326
MIHST	1	13	9	0	0.00%	0.00%	0.0710
	2	167	137	127	76.05%	92.70%	0.5067
	3	16	50	15	93.75%	30.00%	0.2378
HPF	1	13	60	10	76.92%	16.67%	0.1075
	2	167	102	99	59.28%	97.06%	0.8012
	3	16	34	12	75.00%	35.29%	0.2954
WT	1	13	45	8	61.54%	17.78%	0.1194
	2	167	116	109	65.27%	93.97%	0.5922
	3	16	35	9	56.25%	25.71%	0.1911
EF	1	13	19	6	46.15%	31.58%	0.2672
	2	167	168	153	91.62%	91.07%	0.3966
	3	16	9	8	50.00%	88.89%	0.8790
GS	1	13	62	9	69.23%	14.52%	0.0844
	2	167	107	103	61.68%	96.26%	0.7473
	3	16	27	12	75.00%	44.44%	0.3951

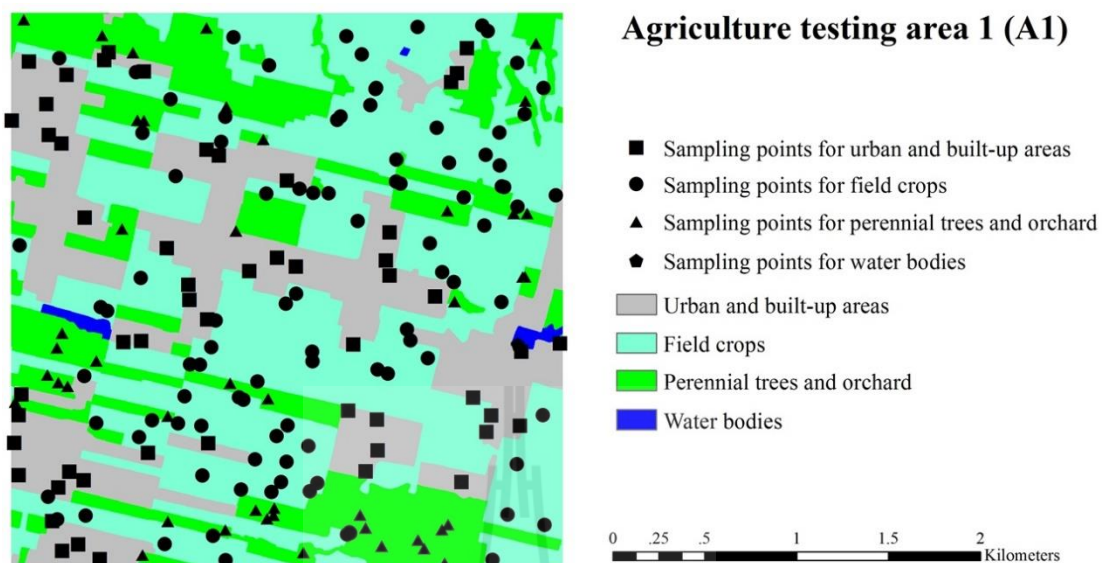
Note: Class Name 1, 2, and 3 are field crops, perennial trees and orchard, and forest land, respectively.

D.6 Results of accuracy assessment in urban testing area 2 (U2)

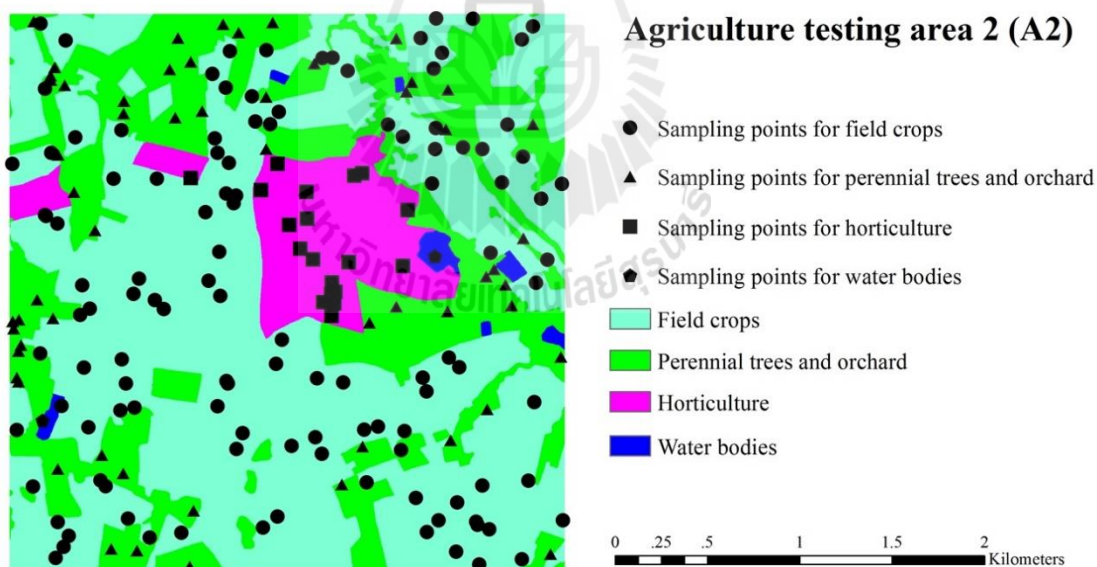
Method	Class Name	Reference	Classified	Correct	Producer Accuracy	User Accuracy	Conditional Kappa
BT	1	3	8	3	100.00%	37.50%	0.3653
	2	14	45	8	57.14%	17.78%	0.1145
	3	176	128	122	69.32%	95.31%	0.5406
	4	3	15	3	100.00%	20.00%	0.1876
MT	1	3	6	3	100.00%	50.00%	0.4922
	2	14	51	11	78.57%	21.57%	0.1554
	3	176	124	121	68.75%	97.58%	0.7629
	4	3	15	3	100.00%	20.00%	0.1876
PCA	1	3	8	3	100.00%	37.50%	0.3653
	2	14	63	10	71.43%	15.87%	0.0940
	3	176	105	101	57.39%	96.19%	0.6267
	4	3	20	3	100.00%	15.00%	0.1368
IHST	1	3	16	3	100.00%	18.75%	0.1749
	2	14	49	8	57.14%	16.33%	0.0989
	3	176	124	118	67.05%	95.16%	0.5258
	4	3	7	3	100.00%	42.86%	0.4197
MIHST	1	3	9	3	100.00%	33.33%	0.3230
	2	14	83	8	57.14%	9.64%	0.0269
	3	176	66	65	36.93%	98.48%	0.8515
	4	3	38	3	100.00%	7.89%	0.0646
HPF	1	3	9	2	66.67%	22.22%	0.2101
	2	14	69	12	85.71%	17.39%	0.1104
	3	176	92	89	50.57%	96.74%	0.6804
	4	3	26	3	100.00%	11.54%	0.1016
WT	1	3	9	3	100.00%	33.33%	0.3230
	2	14	53	10	71.43%	18.87%	0.1263
	3	176	122	118	67.05%	96.72%	0.6787
	4	3	12	3	100.00%	25.00%	0.2383
EF	1	3	15	3	100.00%	20.00%	0.1876
	2	14	51	10	71.43%	19.61%	0.1342
	3	176	120	116	65.91%	96.67%	0.6733
	4	3	10	3	100.00%	30.00%	0.2891
GS	1	3	9	3	100.00%	33.33%	0.3230
	2	14	67	12	85.71%	17.91%	0.1160
	3	176	106	104	59.09%	98.11%	0.8151
	4	3	14	3	100.00%	21.43%	0.2021

Note: Class Name 1, 2, 3, and 4 are urban and built-up areas, commercial land, waterbodies, and miscellaneous land, respectively.

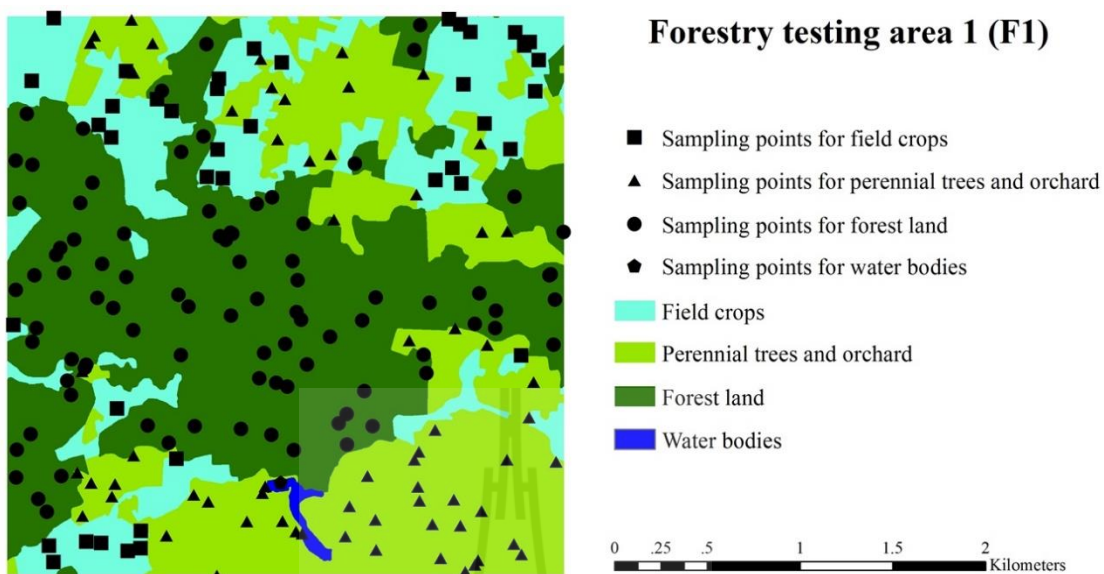
D.7 Distribution of sampling points in agriculture testing area 1 (A1)



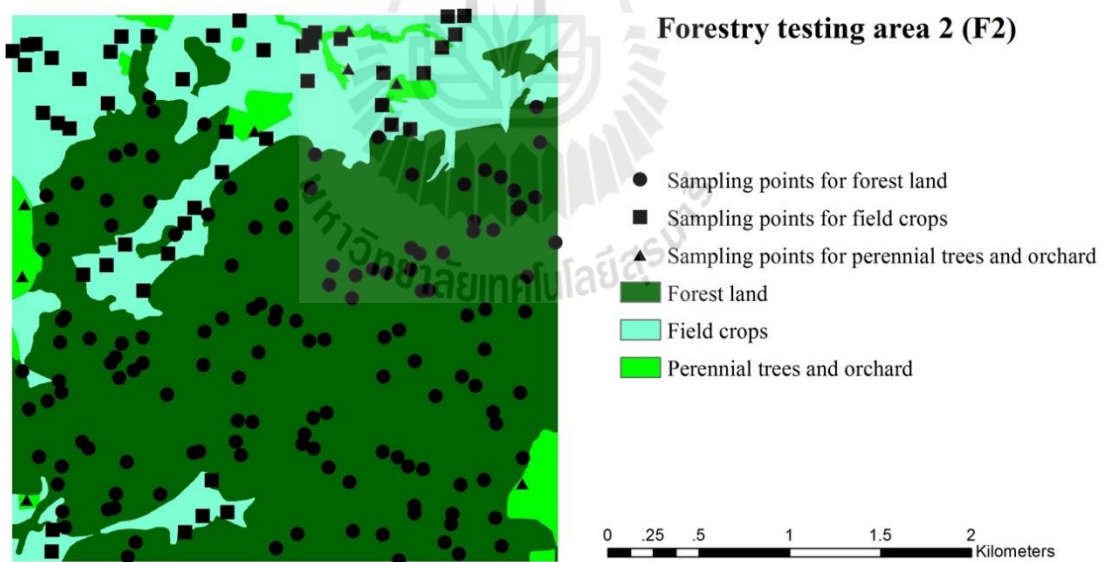
D.8 Distribution of sampling points in agriculture testing area 2 (A2)



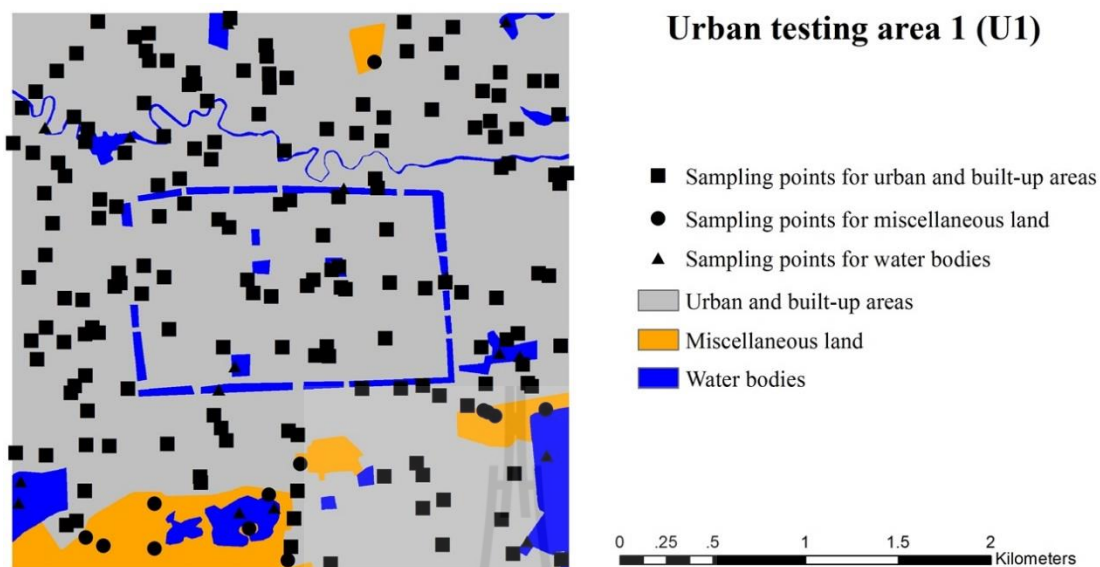
D.9 Distribution of sampling points in forestry testing area 1 (F1)



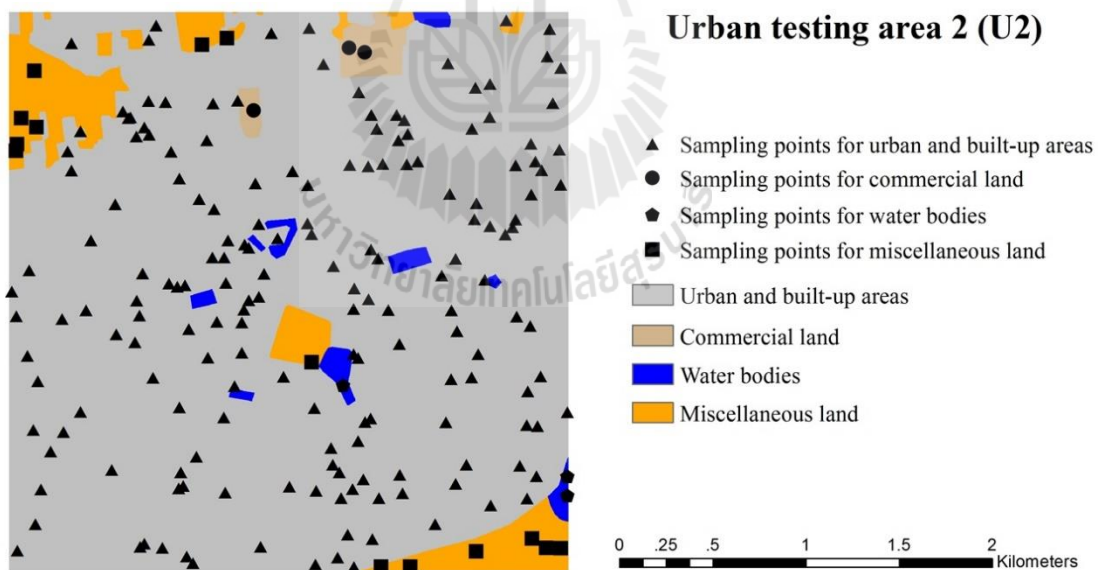
D.10 Distribution of sampling points in forestry testing area 2 (F2)



D.11 Distribution of sampling points in urban testing area 1 (U1)



D.12 Distribution of sampling points in urban testing area 2 (U2)



CURRICULUM VITAE

Name : Sawarin Lerk-u-suke

Date of Birth : 20 July 1978

Place of Birth : Kamphaeng Phet, Thailand.

Education :

2001 Bachelor of Science (Geography): Faculty of Agriculture,
Natural Resources and Environmental, Naresuan University, Thailand.

2007 Master of Science (Spatial Information System in
Engineering): Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

Grants and Fellowships :

The Royal Thai Government Scholarships (The Commission on
Higher Education)

Position and Place of Work :

Lecturer in Department of Geographic Information Science,
School of Information and Communication Technology, University of Phayao,
Thailand.