

**COMPRESSION OF THREE-DIMENSIONAL TERRAIN DATA USING
LIFTING SCHEME BASED ON SECOND GENERATION WAVELETS**

By

BISWAJEET PRADHAN

**Thesis Submitted to the School of Graduate Studies, Universiti Putra Malaysia, in
Fulfilment of the Requirement for the Degree of Doctor of Philosophy**

July 2006

Abstrak tesis yang dikemukakan kepada Senat Universiti Putra Malaysia sebagai memenuhi keperluan untuk ijazah Doktor Falsafah

**MAMPATAN DATA TERRAIN TIGA DIMENSI MENGGUNAKAN SKEMA
ANGKATAN BERDASARKAN WAVELET GENERASI KEDUA**

Oleh

BISWAJEET PRADHAN

Julai 2006

Pengerusi : Professor Shattri Mansor

Fakulti : Kejuruteraan

Data Sistem Maklumat Geografi (GIS) yang paling kompleks adalah data bentuk permukaan bumi tiga dimensi. Di dalam aplikasi Sistem Maklumat Geografi, penyampaian realistik bagi suatu bentuk muka bumi seperti Digital Elevation Model (DEM) tidak sesuai digunakan secara langsung di dalam perkhidmatan GIS online disebabkan saiznya yang besar serta struktur data yang tidak fleksibel. Rangkaian Triangulasi Tidak Lazim “Triangulated Irregular Network” (TIN), satu lagi format data yang popular untuk data tiga dimensi, memerlukan bilangan segitiga yang banyak. Segitiga-segitiga ini yang mewakili rupa bentuk bagi suatu permukaan akhirnya meninggikan saiz data. Bagi program interaktif Sistem Maklumat Geografi secara “online” keutamaan terletak dalam mengurangkan bilangan segitiga untuk mendapatkan ruangan penyimpanan yang lebih banyak. Sistem pemampatan imej yang sedia ada untuk data permukaan GIS yang

mempunyai jalur lebar dan had saiz imej yang menyebabkan transmisi data permukaan yang tidak diproses serta dimampatkan mengambil masa yang lama. Oleh itu, faktor pemampatan imej merupakan kunci kepada memperbaiki kelajuan transmisi dan simpanan, akan tetapi risikonya adalah kehilangan maklumat permukaan yang relevan. Dalam pada itu, kebanyakan algoritma adalah berdasarkan kepada samaada transmisi Fourier atau teknik-teknik wavelet tertib pertama. Sehingga kini hanya sedikit kajian yang telah dilakukan untuk pemampatan data permukaan Sistem Maklumat Geografi (GIS) berdasarkan wavelet generasi kedua. Teknologi wavelet generasi kedua membekalkan alat pemampatan yang efisien untuk mencapai nisbah pemampatan tinggi dan pada masa yang sama, ia mengekalkan ketepatan bolehterima kualiti permukaan tersebut.

Dorongan utama yang membawa kepada hasil kajian ini adalah disebabkan terdapatnya keperluan untuk mencari satu teknik pemampatan data Sistem Maklumat Geografi. Tesis ini menyampaikan satu teknik pemampatan data yang baru, di mana menggunakan skema angkatan berdasarkan wavelet generasi kedua. Skema angkatan ini didapati satu kaedah yang fleksibel untuk membina skala wavelet dengan ciri-ciri yang diinginkan. Di dalam tesis ini ianya telah dilanjutkan kepada pemampatan data GIS. Malahan satu pendekatan yang baru dalam pemampatan data telah dicipta untuk menganggar bentuk muka bumi dengan menggunakan siri-siri segitiga tidak bertindih. Pada amnya Rangkaian Triangulasi Tidak Lazim “Triangulated Irregular Network” (TIN) merupakan model

permukaan digital yang paling biasa yang meliputi nilai (z) dengan kordinat-kordinat x, y yang menghasilkan segitiga tersebut. Pertama sekali, set titik-titik yang tidak seragam diambil dan digunakan untuk mencari isyarat purata dan isyarat berbeza (koefisien terperinci). Triangulasi Delaunay dan spline bivarians digunakan untuk menganggar isyarat purata dan isyarat berbeza. Pendekatan ini meliputi langkah-langkah yang berikut: Pertama, dengan menggunakan Triangulasi Delaunay, permukaan Rangkaian Triangulasi Tidak Lazim (TIN) dijanakan bagi daripada suatu set data secara rambang. Satu penapisan interpolasi wavelet yang baru untuk Rangkaian Triangulasi Tidak Lazim (TIN) telah diperkenalkan di dalam dua langkah, iaitu belahan dan elevasi. Di dalam langkah belahan, satu segitiga telah dibahagikan kepada beberapa sub-segitiga dan langkah elevasi telah digunakan untuk “mengubahsuai” nilai-nilai titik (titik mengkoordinasikan geometri) selepas belahan. Selepas itu, set data ini dimampatkan di lokasi yang diinginkan menggunakan wavelet generasi kedua. Isyarat berbeza tinggi atau nilai koefisien terperinci menandakan keketaraan pada suatu titik. Hanya set dengan titik-titik yang ketara akan digunakan untuk mewakili permukaan. Splin dwivariat digunakan untuk mengkuantitikan isyarat di atas triangulasi Delaunay. Saiz bagi set titik-titik signifikan ini akan menjadi sangat kecil berbanding set data asal dan maka fail data tersebut akan dimampatkan. Set data ini boleh dipindahkan dengan mudah dan imej bentuk muka bumi boleh dihasilkan semula dengan menggunakan satu program yang kecil berdasarkan kepada triangulasi Dalaunay dan splin dwivariat. Toolbox memproses imej bagi MATLAB (versi 7) digunakan untuk membina program

berdasarkan pada skema angkatan bagi multiresolusi mewakili bentuk permukaan bumi. Ralat Kuasa dua Min (Mean Square Error) dan nisbah Isyarat Puncak ke Hingar dikira. Algoritma yang dibina ini telah digunakan untuk memampat data Pengesanan Cahaya dan Julat “Light Detection and Ranging” (LIDAR) untuk memeriksa kecekapan program tersebut. Kualiti permukaan geografi selepas menggunakan teknik yang disyorkan itu dibandingkan dengan data asal LIDAR. Keputusan menunjukkan bahawa kaedah ini boleh digunakan untuk mengurangkan set data dengan ketara.

**Abstrak tesis yang dikemukakan kepada Senat Universiti Putra Malaysia
sebagai memenuhi keperluan untuk ijazah Doktor Falsafah**

**MAMPATAN DATA TERRAIN TIGA DIMENSI MENGGUNAKAN SKEMA
ANGKATAN BERDASARKAN WAVELET GENERASI KEDUA**

Oleh

BISWAJEET PRADHAN

Julai 2006

Pengerusi : Professor Shattri Mansor

Fakulti : Kejuruteraan

Data Sistem Maklumat Geografi (GIS) yang paling kompleks adalah data bentuk permukaan bumi tiga dimensi. Di dalam aplikasi Sistem Maklumat Geografi, penyampaian realistik bagi suatu bentuk muka bumi seperti Digital Elevation Model (DEM) tidak sesuai digunakan secara langsung di dalam perkhidmatan GIS online disebabkan saiznya yang besar serta struktur data yang tidak fleksibel. Rangkaian Triangulasi Tidak Lazim “Triangulated Irregular Network” (TIN), satu lagi format data yang popular untuk data tiga dimensi, memerlukan bilangan segitiga yang banyak. Segitiga-segitiga ini yang mewakili rupa bentuk bagi suatu permukaan akhirnya meninggikan saiz data. Bagi program interaktif Sistem Maklumat Geografi secara “online” keutamaan terletak dalam mengurangkan bilangan segitiga untuk mendapatkan ruangan penyimpanan yang lebih banyak. Sistem pemampatan imej yang sedia ada untuk data permukaan GIS yang mempunyai jalur lebar dan had saiz imej yang menyebabkan transmisi data permukaan yang tidak diproses serta

dimampatkan mengambil masa yang lama. Oleh itu, faktor pemampatan imej merupakan kunci kepada memperbaiki kelajuan transmisi dan simpanan, akan tetapi risikonya adalah kehilangan maklumat permukaan yang relevan. Dalam pada itu, kebanyakan algoritma adalah berdasarkan kepada samaada transmisi Fourier atau teknik-teknik wavelet tertib pertama. Sehingga kini hanya sedikit kajian yang telah dilakukan untuk pemampatan data permukaan Sistem Maklumat Geografi (GIS) berdasarkan wavelet generasi kedua. Teknologi wavelet generasi kedua membekalkan alat pemampatan yang efisien untuk mencapai nisbah pemampatan tinggi dan pada masa yang sama, ia mengekalkan ketepatan bolehterima kualiti permukaan tersebut.

Dorongan utama yang membawa kepada hasil kajian ini adalah disebabkan terdapatnya keperluan untuk mencari satu teknik pemampatan data Sistem Maklumat Geografi. Tesis ini menyampaikan satu teknik pemampatan data yang baru, di mana menggunakan skema angkatan berdasarkan wavelet generasi kedua. Skema angkatan ini didapati satu kaedah yang fleksibel untuk membina skala wavelet dengan ciri-ciri yang diinginkan. Di dalam tesis ini ianya telah dilanjutkan kepada pemampatan data GIS. Malahan satu pendekatan yang baru dalam pemampatan data telah dicipta untuk menganggar bentuk muka bumi dengan menggunakan siri-siri segitiga tidak bertindih. Pada amnya Rangkaian Triangulasi Tidak Lazim “Triangulated Irregular Network” (TIN) merupakan model permukaan digital yang paling biasa yang meliputi nilai (z) dengan kordinat-kordinat x, y yang menghasilkan segitiga tersebut. Pertama sekali, set titik-titik yang tidak seragam diambil dan digunakan untuk mencari isyarat purata dan isyarat berbeza (koefisien terperinci). Triangulasi Delaunay

dan spline bivarians digunakan untuk menganggar isyarat purata dan isyarat berbeza. Pendekatan ini meliputi langkah-langkah yang berikut: Pertama, dengan menggunakan Triangulasi Delaunay, permukaan Rangkaian Triangulasi Tidak Lazim (TIN) dijanakan bagi daripada suatu set data secara rambang. Satu penapisan interpolasi wavelet yang baru untuk Rangkaian Triangulasi Tidak Lazim (TIN) telah diperkenalkan di dalam dua langkah, iaitu belahan dan elevasi. Di dalam langkah belahan, satu segitiga telah dibahagikan kepada beberapa sub-segitiga dan langkah elevasi telah digunakan untuk “mengubahsuai” nilai-nilai titik (titik mengkoordinasikan geometri) selepas belahan. Selepas itu, set data ini dimampatkan di lokasi yang diinginkan menggunakan wavelet generasi kedua. Isyarat berbeza tinggi atau nilai koefisien terperinci menandakan keketaraan pada suatu titik. Hanya set dengan titik-titik yang ketara akan digunakan untuk mewakili permukaan. Spline dwivariat digunakan untuk mengkuantitikan isyarat di atas triangulasi Delaunay. Saiz bagi set titik-titik signifikan ini akan menjadi sangat kecil berbanding set data asal dan maka fail data tersebut akan dimampatkan. Set data ini boleh dipindahkan dengan mudah dan imej bentuk muka bumi boleh dihasilkan semula dengan menggunakan satu program yang kecil berdasarkan kepada triangulasi Delaunay dan spline dwivariat. Toolbox memproses imej bagi MATLAB (versi 7) digunakan untuk membina program berdasarkan pada skema angkatan bagi multiresolusi mewakili bentuk permukaan bumi. Ralat Kuasa dua Min (Mean Square Error) dan nisbah Isyarat Puncak ke Hingar dikira. Algoritma yang dibina ini telah digunakan untuk memampatkan data Pengesanan Cahaya dan Julat “Light Detection and Ranging” (LIDAR) untuk memeriksa kecekapan program tersebut. Kualiti permukaan geografi selepas

menggunakan teknik yang disyorkan itu dibandingkan dengan data asal LIDAR. Keputusan menunjukkan bahawa kaedah ini boleh digunakan untuk mengurangkan set data dengan ketara.

TABLE OF CONTENTS

	Page
DEDICATION	ii
ABSTRACT	iii
ABSTRAK	vi
ACKNOWLEDGEMENTS	ix
APPROVAL	xi
DECLARATION	xiii
LIST OF TABLES	xviii
LIST OF FIGURES	xxi
LIST OF ABBREVIATIONS	xxvi
 CHAPTER	
1 INTRODUCTION	1.1
1.1 Preface	
1.1	
1.2 Problem Statement	1.2
1.3 Motivation	1.3
1.4 Background	1.4
1.5 Research Aim and Objectives	
1.5	
1.6 Major Findings	1.6
1.7 Organization of Remaining Chapters	
1.8	
 2 LITERATURE REVIEW	 2.1
2.1 Introduction	2.1
2.2 Triangulated Irregular Network	2.2
2.3 Types of Triangulation	2.4
2.3.1 Quadtree Triangulation	2.4
2.3.2 Quaternary Triangulation	2.5
2.3.3 Ternary Triangulation	
2.6	
2.3.4 Delaunay Pyramid	2.7
2.3.5 The Delaunay Triangulation	
2.8	
2.4 General TIN Compression	2.13
2.4.1 IBM Algorithm	2.13
2.4.2 Hoppe's Progressive Mesh	2.14
2.4.3 Touma's Mesh Compression	
2.14	
2.4.4 Gumhold's Method	2.15

	2.4.5	Floriani's Method	2.15
	2.4.6	Adaptive Triangulations	2.15
	2.4.7	Summary of Compression Algorithm	2.16
2.5		Digital Image Compression	2.17
	2.5.1	Lossy Compression	2.19
	2.5.2	Lossless Image Compression	2.32
	2.5.3	Wavelets in GIS Applications	2.39
	2.5.4	Second Generation Wavelets in GIS Applications	2.43
2.6		Mathematical Consideration	2.47
	2.6.1	Mathematical Representation of Delaunay Triangulation	2.47
	2.6.2	Mathematical Representation of Wavelets	2.51
2.7		Existing GIS Software for Image Compression	2.59
2.8		Summary	2.61
3		METHODOLOGY	3.1
	3.1	Introduction	3.1
	3.2	Input Data Structure	3.2
	3.3	Method for Compression of Terrain Data	3.4
	3.3.1	Construction of Delaunay Triangulation Based on Convex Hull Algorithm	3.5
	3.3.2	Description of the Algorithm	3.10
	3.3.3	Implementation of Delaunay Convex Hull Algorithm	3.10
	3.4	The Data Format and Data Structure for Computation	3.11
	3.5	Data Input and Output	3.15
	3.6	Application of Lifting Scheme for TIN Data Representation	3.15
	3.7	The Lifting Scheme	3.17
	3.7.1	Splitting Step	3.21
	3.7.2	Predicting Step	3.22
	3.7.3	Updating Step	3.24
	3.8	Forward and Inverse Transform	3.25
	3.9	The Coding Scheme	3.27
	3.10	Evaluation of Compressed Image Quality (Performance Measures)	3.31

	3.10.1 Objective Method	3.32
	3.10.2 Subjective Method	3.35
	3.10.3 Correlation between Objective and Subjective	
3.36	Method	
4	RESULTS AND DISCUSSION	4.1
4.1	Introduction	4.1
4.2	Experimental Results	
	4.1	
	4.2.1 LIDAR Imagery	4.2
	4.2.2 Contour Data	4.24
	4.2.3 Computing Time	4.49
	4.2.4 Data Storage	4.51
4.3	Summary	4.53
5	CONCLUSIONS AND FUTURE WORK	5.1
5.1	Summary and Conclusions	5.1
5.2	Future Works and Recommendations	
	5.8	
	REFERENCES	R.1
	APPENDICES	A.1
	BIODATA OF THE AUTHOR	B.1
	LIST OF PUBLICATIONS AND SCIENTIFIC PRESENTATIONS	B.3

LIST OF TABLES

Table	Page
2.1 A Summary of Compression Algorithms	2.16
3.1 Approximate file sizes for raw LIDAR data	
3.3	
3.2 Data structure for the points and triangles	
3.13	
3.3 Data structure for edge of triangle	3.13
3.4 Data structure for TIN	
3.14	
3.5 Data format for storage (adapted from Wu and Amartunga, 2003)	3.31
4.1 Data Summary for LIDAR Images	4.3
4.2 Comparison between different LIDAR images using PSNR, MSE and compression ratio	4.13
4.3 Analysis result for First LIDAR image	4.19
4.4 Analysis result for Second LIDAR image	4.19
4.5 Analysis result for Third LIDAR image	4.20
4.6 Mean Opinion Score (MOS) for compressed images of first LIDAR	4.21
4.7 Mean Opinion Score (MOS) for compressed images of second LIDAR	4.22
4.8 Mean Opinion Score (MOS) for compressed images of third LIDAR	4.22
4.9 Data Summary Table for images derived from contours	
4.25	
4.10 Comparison between Cameron, Selangor, Kelantan, Gebeng data	
4.25	
using PSNR, MSE and compression ratio	
4.11 Compression results for the Cameron Highland data set	4.31

4.12	Compression results for the Penang Island data set 4.32	
4.13	Compression results for the Kelantan data set	4.32
4.14	Compression results for the Tanjung Piai data set 4.33	
4.15	Compression results for the Gebeng data set 4.33	
4.16	Storage requirements of vertices and triangles	4.52
4.17	Summary of PSNR comparison at compression ratio 50:1 and 120:1	4.58
4.18	Summary of RMSE comparison at compression ratio 50:1 and 120:1	4.58
A.1	Analysis of first LIDAR images using JPEG 2000	A.1
A.2	Analysis of first LIDAR images using ECW A.1	
A.3	Analysis of first LIDAR images using MrSID	A.2
A.4	Analysis of first LIDAR images using lifting scheme	A.2
A.5	Analysis of second LIDAR images using JPEG 2000	A.2
A.6	Analysis of second LIDAR images using ECW	A.2
A.7	Analysis of second LIDAR images using MrSID	A.3
A.8	Analysis of second LIDAR images using lifting scheme	A.3
A.9	Analysis of third LIDAR images using JPEG 2000 A.3	
A.10	Analysis of third LIDAR images using ECW A.3	
A.11	Analysis of third LIDAR images using MrSID	A.4
A.12	Analysis of third LIDAR images using lifting scheme	A.4
A.13	Mean Opinion Score (MOS) for compressed images of Cameron data	A.5

A.14	Mean Opinion Score (MOS) for compressed images of Penang data	A.5
A.15	Mean Opinion Score (MOS) for compressed images of Kelantan data	A.5
A.16	Mean Opinion Score (MOS) for compressed images of Tanjung Piai	A.6
A.17	Mean Opinion Score (MOS) for compressed images of Gebeng data	A.6
A.18	Analysis of Cameron images using JPEG 2000	A.7
A.19	Analysis of Cameron images using ECW	A.7
A.20	Analysis of Cameron images using MrSID	A.7
A.21	Analysis of Cameron images using lifting scheme	A.8
A.22	Analysis of Penang images using JPEG 2000	A.8
A.23	Analysis of Penang images using ECW	A.8
A.24	Analysis of Penang images using MrSID	A.9
A.25	Analysis of Penang images using lifting scheme	A.9
A.26	Analysis of Kelantan images using JPEG 2000	A.9
A.27	Analysis of Kelantan images using ECW	A.9
A.28	Analysis of Kelantan images using MrSID	A.10
A.29	Analysis of Kelantan images using lifting scheme	A.10
A.30	Analysis of Tanjung Piai images using JPEG 2000	A.10
A.31	Analysis of Tanjung Piai images using ECW	A.10
A.32	Analysis of Tanjung Piai images using MrSID	A.11
A.33	Analysis of Tanjung Piai images using lifting scheme	A.11
A.34	Analysis of Gebeng images using JPEG 2000	A.11
A.35	Analysis of Gebeng images using ECW	A.11

A.36	Analysis of Gebeng images using MrSID	A.12
A.36	Analysis of Gebeng images using lifting scheme	A.12
B.1	Mean Opinion Score (MOS) and related description	
	A.13	
B.2	Evaluation form for compressed LIDAR image quality	A.13
B.3	Evaluation form for compressed image quality derived from contour	A.14
B.4	Lossy image Compression techniques	A.14

LIST OF FIGURES

Figure	Page
2.1 The Quadtree data structure	
2.5	
2.2 The Quaternary data structure	
2.6	
2.3 The Ternary data structure	2.7
2.4 Delaunay pyramid	2.8
2.5 A Typical Lossy Signal/Image Encoder	2.19
2.6 JPEG Encoder Block Diagram (Bradley and Erickson, 2002)	2.23
2.7 JPEG Decoder Block Diagram (Bradley and Erickson, 2002)	2.23
2.8 Zig-Zag sequence	2.24
2.9 Original Lena Image, and (b) Reconstructed Lena with DC component 2.26 only, to show blocking artifacts adapted from Malavar, 1992	
2.10 Block diagram of the JPEG2000 (encoder and decoder)	2.27
2.11 The Encoder and decoder in a vector quantizer	2.30
2.12 An example of a 1-Dimensional VQ	
2.30	
2.13 An example of a 2-Dimensional VQ	
2.31	
2.14 Block diagram of lossless image compression	2.33
2.15 Some predictors used by modern image compression techniques 2.34 (Watson, 1993)	

2.16	Huffman coding algorithm (Courtesy: Gonzalez and Woods, 1993)	
2.36		
2.17	Three level octave-band decomposition of Lena image, and (b) Spectral decomposition and ordering (courtesy: Cohen et al., 1992)	2.42
2.18	A Delaunay triangulation	2.49
2.19	Each edge on the convex hull is Delaunay, because it is always possible to find an empty circle that passes through its endpoints	2.49
2.20	Every triangle of a Delaunay triangulation has an empty circumcircle	2.50
2.21	If the triangle t is not Delaunay, then at least one of its edges (in this case, e) is not Delaunay	2.50
2.22	Typical Delaunay triangulation	2.51
2.23	Haar wavelet transform	2.53
3.1	Overall methodology for the research	
3.2		
3.2	Terrain data in ASCII format.	
3.3		
3.3	Graphical illustration of creation of convex hull and Delaunay triangulation for 12 points	3.8
3.4	Flow chart showing the algorithm for the triangulation	3.9
3.5	Topological data structures for construction of Delaunay 3.14 triangulations adapted from Tsai (1993).	
3.6	Graphical representation of a signal $S_n(x)$	3.19
3.7	Signal over odd and even samples	3.20
3.8	Signal S_n is splitted into even and detail coefficients	
3.21		

3.9	Graphical illustration of Lifting scheme	3.23
3.10	Wiring diagram of forward transform	
	3.26	
3.11	Wiring diagram of inverse transform	
	3.26	
3.12	Undo merging step	3.27
3.13	Centroid of a triangle that consists of three vertices	
	3.28	
3.14	Flow chart of the PSNR test for the desired images	
	3.34	
4.1	TIN representation for the first LIDAR image	4.3
4.2	Compression results for first LIDAR image	
	4.6	
4.3	Results of triangulations for first LIDAR image (a) Original image	
	4.7	
	(b) triangulation at compression ratio of 50:1 (c) triangulation at compression ratio of 120:1	
4.4	Compression results for second LIDAR image	4.8
4.5	Results of triangulations for second LIDAR image	
	4.9	
	(a) Original image (b) triangulation at compression ratio of 50:1 (c) Triangulation at compression ratio of 120:1	
4.6	Compression results for third LIDAR image	
	4.10	
4.7	Results of triangulations for third LIDAR image (a) Original image	4.11
	(b) Triangulation at compression ratio of 50:1 (c) Triangulation at compression ratio of 120:1	
4.8	Graph between PSNR against compression ratio for all three LIDAR images	4.13

4.9	Graph between MSE against compression ratio for all three 4.14 LIDAR images	
4.10	PSNR comparison of First LIDAR	4.15
4.11	PSNR comparison of Second LIDAR 4.16	
4.12	PSNR comparison of Third LIDAR 4.16	
4.13	RMSE comparison of First LIDAR	4.17
4.14	RMSE comparison of Second LIDAR	4.17
4.15	RMSE comparison of Third LIDAR 4.18	
4.16	Graph between MOS against compression ratio for all LIDAR images	4.23
4.17	Graph between the number of triangles against compression ratio for all LIDAR images	4.23
4.18	Compression results for Cameron image (a) Original image (CR=0) (b) CR=20:1 (PSNR = 43.8 dB) (c) CR=30:1 (PSNR = 41.6 dB) (d) CR=50:1 (PSNR = 39 dB) (e) CR=70:1 (PSNR = 37.4 dB) (f) CR=90:1 (PSNR = 36 dB) (g) CR=100:1 (PSNR = 34 dB) (h) CR=120:1 (PSNR = 30 dB)	4.26
4.19	Compression results for Penang image (a) Original image (CR=0) 4.27 (b) CR=20:1 (PSNR = 42.3 dB) (c) CR=30:1 (PSNR = 41 dB) (d) CR=50:1 (PSNR = 39 dB) (e) CR=70:1 (PSNR = 37.3 dB) (f) CR=90:1 (PSNR = 34 dB) (g) CR=100:1 (PSNR = 31 dB) (h) CR=120:1 (PSNR = 27 dB)	
4.20	Compression results for Kelantan image (a) Original image (CR=0) (b) CR=20:1 (PSNR = 45 dB) (c) CR=30:1 (PSNR = 43 dB) (d) CR=50:1 (PSNR = 41 dB) (e) CR=70:1 (PSNR = 38.4 dB) (f) CR=90:1 (PSNR = 35 dB) (g) CR=100:1 (PSNR = 33 dB) (h) CR=120:1 (PSNR = 31 dB)	4.28

4.21	Compression results for Tanjung Piai image (a) Original image (CR=0) 4.29 (b) CR=20:1 (PSNR = 43 dB) (c) CR=30:1 (PSNR = 42.1 dB) (d) CR=50:1 (PSNR = 40.3 dB) (e) CR=70:1 (PSNR = 36.8 dB) (f) CR=90:1 (PSNR = 34.3 dB) (g) CR=100:1 (PSNR = 32.3 dB) (h) CR=120:1 (PSNR = 30 dB)	
4.22	Compression results for Gebeng image (a) Original image (CR=0) 4.30 (b) CR=20:1 (PSNR = 37.2 dB) (c) CR=30:1 (PSNR = 35.4 dB) (d) CR=50:1 (PSNR = 34 dB) (e) CR=70:1 (PSNR = 31 dB) (f) CR=90:1 (PSNR = 30 dB) (g) CR=100:1 (PSNR = 29.1 dB) (h) CR=120:1 (PSNR = 27 dB)	
4.23	Comparison between compression ratio and MSE for Penang, Cameron, Kelantan, Tanjung Piai and Gebeng data set	4.36
4.24	Comparison between compression ratio and PSNR for Penang, Cameron, Kelantan, Tanjung Piai and Gebeng data set	4.36
4.25	Graph between MOS against compression ratio for all compressed images	4.37
4.26	Graph between number of vertices against compression ratio for Cameron highland	4.37
4.27	Graph between number of vertices against compression ratio for Penang Island	4.38
4.28	Graph between number of vertices against compression ratio for Kelantan	4.38
4.29	Graph between number of vertices against compression ratio for Tanjung Piai	4.39
4.30	Graph between number of vertices against compression ratio for Gebeng	4.39
4.31	RMSE comparisons of compressed images Cameron highland	4.41
4.32	RMSE comparisons of compressed images 4.42	Penang Island
4.33	RMSE comparisons of compressed images 4.42	Kelantan

4.34	RMSE comparisons of compressed images	Tanjung Piai	
	4.43		
4.35	RMSE comparisons of compressed images	Gebeng	
	4.43		
4.36	PSNR comparisons of compressed images Cameron highland		4.44
4.37	PSNR comparisons of compressed images Penang Island		
	4.44		
4.38	PSNR comparisons of compressed images Kelantan		4.45
4.39	PSNR comparisons of compressed images Tanjung Piai		4.45
4.40	PSNR comparisons of compressed images Gebeng		4.46
4.41	Graph between numbers of triangles in percentage against		
	4.48		
	associated error		
4.42	Comparison of computing time vs. compression ratio		4.51
4.43	Graph between number of data points and required storage		
	4.53		

LIST OF ABBREVIATIONS

WT	Wavelet Transform
CWT	Continuous Wavelet Transform
DWT	Discrete Wavelet Transform
DCT	Discrete Cosine Transform
IDWT	Inverse Discrete Wavelet Transform
DDWT	Discrete Dyadic Wavelet Transform
FFT	Fast Fourier Transformation
DWF	Discrete Wavelet Frames
DWP	Discrete Wavelet Packets
SWT	Discrete Stationary Transform
MATLAB	Software brand name from Mathworks Inc
YaWTB	Yet another wavelet toolbox
TIN	Triangulated Irregular Network
DTM	Digital Terrain Model
DSM	Digital Surface Model
LASER	Light Amplification by Simulated Emission of Radiation
1D	1 Dimensional
2D	2 Dimensional
3D	3 Dimensional
GIS	Geographic Information System
LIDAR	Light Detection And Ranging

INS	Inertial Navigation System
GPS	Global Positioning System
FOV	Field Of View
IFOV	Instantaneous Field Of View
STFT	Short Time Fourier Transform
FT	Fourier Transform
WFT	Windowed Fourier Transform
FIR	Finite Impulse Response
QMT	Quadrature Mirror Filters
WC	Wavelet Compression
WTIN	Wavelet Triangulated Irregular Network
FORTTRAN	Software brand name
NA	Not available
PSNR	Peak-Signal-to-Noise-Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
NMSE	Normalized Mean Squared Error
MSE	Mean Squared Error
CR	Compression Ratio
dB	Decibels
DT	Delaunay Triangulation
AT	Adaptive Triangulation
JPEG	Joint Photographic Expert Group
JPEG2000	Joint Photographic Expert Group 2000
MOS	Mean Opinion Score

QF	Quality Factor
RLE	Run Length Coding
SPIHT	Set Partitioning in Hierarchical Trees
TIFF	Tagged Image File Format
VQ	Vector Quantization
WWW	World Wide Web
EZW	Embedded Zero Tree Wavelet