

PENILAIAN KUANTITATIF PRODUK FOTOGRAMETRI BERASASKAN  
PESAWAT UDARA TANPA PEMANDU UNTUK  
PEMETAAN TOPOGRAFI SKALA BESAR

KHAIRIL AFENDY HASHIM

Tesis ini dikemukakan sebagai memenuhi  
syarat penganugerahan ijazah  
Doktor Falsafah dalam (Kejuruteraan Geomatik)

Fakulti Alam Bina dan Ukur  
Universiti Teknologi Malaysia

MAC 2020

## **DEDIKASI**

Almarhum Ayahanda,

Bonda,

Isteri-Isteriku

serta

Putra Putri ku

Moga Allah jua membalas  
pengorbanan, kesabaran & dorongan kalian

Al-Fatihah

## **PENGHARGAAN**

Alhamdulillah. Bersyukur ke hadrat Ilahi kerana dengan limpah kurnia dan keizinan-nya, tesis Ijazah Doktor Falsafah (Kejuruteraan Geomatik) ini dapat disempurnakan dengan jaya-nya. Jutaan penghargaan dan terima kasih kepada Profesor Madya Dr. Hj. Anuar Hj. Ahmad di atas segala sokongan yang tidak berbelah bagi samada dalam bentuk wang ringgit, tenaga dan fikiran serta bimbingan dan nasihat yang diberikan sepanjang tempoh tesis ini disiapkan.

Jutaan terima kasih juga kepada Kementerian Pengajian Tinggi (MOHE) dan Universiti Teknologi MARA (UiTM) atas pemberian hadiah latihan berupa biasiswa pengajian di sepanjang tahun pengajian. Penghargaan dan terima kasih juga kepada MOHE melalui Institut Pengurusan Penyelidikan (RMI) UiTM atas penganugerahan Geran Skim Penyelidikan Fundamental (FRGS) atas tajuk tesis ini bagi membiayai kerja-kerja penyelidikan yang berkaitan.

Tidak lupa buat rakan-rakan siswazah di bawah seliaan Profesor Madya Dr. Hj. Anuar Ahmad, terima kasih di atas segala bantuan dan sokongan yang kalian berikan. Moga Allah jua membalas jasa baik anda semua. Akhir kata, harapan saya agar tesis ini dapat dijadikan panduan khususnya buat individu yang terlibat dengan pemetaan berasaskan imej menggunakan platform pesawat udara tanpa pemandu (UAV) serta dimanfaatkan oleh pelajar yang berada dalam bidang Geomatik ke arah kepelbagaian aplikasi dan penggunaan.

## ABSTRAK

Penggunaan pesawat udara dalam bidang pemetaan topografi bukanlah baru malah ianya merupakan kaedah utama dalam penghasilan peta topografi sejak awal abad ke-20 lagi. Dikenali dengan nama fotogrametri, kaedah ini bergantung kepada kamera bagi perolehan imej udara yang dipasang pada platform pesawat berpemandu. Pada masa kini, tumpuan telah diberikan kepada penggunaan Pesawat Udara Tanpa Pemandu (UAV) sebagai platform popular khususnya bagi tujuan pemetaan topografi skala besar. Oleh yang demikian, kajian ini menumpu kepada potensi UAV Kepak Kaku sebagai platform perolehan imej udara untuk menghasilkan produk fotogrametri seperti Model Paramuka Berdigit (DTM) dan ortofoto untuk kegunaan pemetaan topografi skala besar. Sehubungan dengan itu, semua aspek yang berkaitan diambilkira bermula dari rancangan penerbangan, penggambaran udara, kalibrasi kamera, tetapan kamera, taburan Titik Kawalan Bumi (GCP), dan pemprosesan data sehinggalah kepada ketepatan piawai penghasilan produk pemetaan tersebut. Kawasan penyelidikan bagi kajian ini adalah Cameron Highlands, Pahang dan Kampus UiTM Arau, Perlis. Kawalan foto dan titik-titik semak dibuat menggunakan kaedah pengukuran GPS (Sistem Penentuan Sejagat). Pemprosesan data bagi tujuan penjanaan DTM dan ortofoto adalah menggunakan perisian Agisoft<sup>TM</sup> yang dibantu dengan perisian ArcMap<sup>TM</sup> dan Topcon Tool<sup>TM</sup>. Hasil kajian mendapati rancangan penerbangan yang merangkumi proses kalibrasi kamera, penetapan kamera, ketinggian penerbangan, peratusan tindihan imej dan kedudukan titik kawalan merupakan kunci utama kepada ketepatan produk pemetaan menggunakan kaedah ini. Penilaian terhadap produk pemetaan tersebut mendapati ketepatan pemetaan berada dalam ketetapan piawai seperti ditetapkan oleh *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) yang mana secara purata berada di dalam sub-meter dengan ralat min punca kuasa dua (RMSE) bagi koordinat planimetri (utaraan, timuran) dan hipsometrik (ketinggian) masing-masing adalah  $\pm 0.300$  meter, dan  $\pm 0.400$  meter. Ini juga turut membuktikan bahawa imej-imej berdigit yang diambil menggunakan kamera kompak digital dari platform UAV kepek kaku mampu menghasilkan produk-produk pemetaan yang baik dan tepat.

## ABSTRACT

The use of aircraft in the field of topographic mapping is not exactly a new but rather it has been main method in topographic map production since the early 20<sup>th</sup> century. Commonly known by the name, photogrammetry - this method relies on the camera for an aerial image acquisition that is sited on the piloted aircraft platform. Nowadays, much attention has been given to the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAV), which has become a popular platform especially for the purpose of large-scale topographic mapping. Therefore, this research focuses on the potential of Fixed Wing UAV as an aerial image acquisition platform to produce photogrammetric products such as Digital Terrain Model (DTM) and Orthophoto for large-scale topographic mapping. Correspondingly, all relevant aspects are taken into account starting from the flight planning, aerial photography, camera calibration, camera settings, Ground Control Points (GCP) distribution, and data processing up to the accuracy standard of the mapping product generation. The research area for this study are Cameron Highlands, Pahang and UiTM Arau, Perlis Campus. Photo control and verification points are determined by GPS (Global Positioning System) surveying method. The image processing for the purpose of DTM and Orthophoto generation are establish using Agisoft™ software, assisted by ArcMap™ and Topcon Tool™ software. Results show that flight plan that consists of camera calibration process, camera configuration settings, flying altitude, percentage of image overlap and location of control point are the major factors for mapping product accuracy using this method. Assessment of mapping products found that mapping accuracy is within the standard tolerance as set by the American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) which in average are in sub-meter with square root mean error (RMSE) for the planimetric coordinates (northing, easting) and hypsometric (elevation) are  $\pm 0.300$  meter, and  $\pm 0.400$  meter respectively. This also proves that digital images taken using compact digital camera from fixed wing UAV platform is capable of generating good and accurate mapping products.

## SENARAI KANDUNGAN

	TAJUK	MUKA SURAT
	<b>DEKLARASI</b>	<b>iii</b>
	<b>DEDIKASI</b>	<b>iv</b>
	<b>PENGHARGAAN</b>	<b>v</b>
	<b>ABSTRAK</b>	<b>vi</b>
	<b>ABSTRACT</b>	<b>vii</b>
	<b>SENARAI KANDUNGAN</b>	<b>viii</b>
	<b>SENARAI JADUAL</b>	<b>xiii</b>
	<b>SENARAI RAJAH</b>	<b>xv</b>
	<b>SENARAI ISTILAH</b>	<b>xix</b>
	<b>SENARAI SIMBOL</b>	<b>xx</b>
	<b>SENARAI LAMPIRAN</b>	<b>xxi</b>
<b>BAB 1</b>	<b>PENGENALAN</b>	<b>1</b>
	1.1 Pendahuluan	1
	1.2 Pernyataan Masalah	4
	1.3 Matlamat Kajian	7
	1.4 Objektif Kajian	7
	1.5 Skop Kajian	8
	1.6 Metodologi Kajian	9
	1.7 Sumbangan Kajian	10
	1.8 Rumusan Aliran Bab	11
<b>BAB 2</b>	<b>PEMETAAN TOPOGRAFI</b>	<b>13</b>
	2.1 Pendahuluan	13
	2.2 Perolehan Data Topografi	15
	2.3 Pesawat Tanpa Pemandu (UAV) dalam Fotogrametri	15
	2.4 Platfom UAV	17

2.5	Aplikasi UAV dalam Geomatik	20
2.6	Latarbelakang Pembangunan dan Peraturan	22
2.7	Perolehan dan Pemrosesan Data UAV	24
2.8	Rancangan Penerbangan dan Perolehan Imej	25
2.9	Kalibrasi Kamera dan Orientasi Imej	27
2.10	Penjanaan Model Paramuka Berdigit dan Ortofoto	28
2.11	Pasaran dan Aplikasi UAV dalam Pemetaan	28
2.12	Kesimpulan dan Pembangunan	30
<b>BAB 3</b>	<b>METODOLOGI KAJIAN</b>	<b>33</b>
3.1	Pendahuluan	33
3.2	Pengenalan Pesawat	34
3.2.1	Rekabentuk dan Ciri Pesawat	35
3.2.2	Sistem Pesawat	37
3.3	Sistem Sensor	38
3.4	Prosedur Pemetaan Fotogrametri UAV	39
3.4.1	Pra-Perancangan	40
3.4.1.1	Tinjauan Lapangan	40
3.4.1.2	Penubuhan Titik Kawalan Bumi	40
3.4.1.3	Kalibrasi Kamera	41
3.4.2	Rancangan Penerbangan	41
3.4.2.1	Pra-Perancangan	42
3.4.2.2	Rancangan melalui Perisian	42
3.4.3	Pengambaran Udara	43
3.4.3.1	Pemeriksaan Perkakasan	43
3.4.3.2	Pemeriksaan Rancangan Penerbangan	44
3.4.3.3	Perlepasan Pesawat	45
3.4.3.4	Pemeriksaan Telemetri	46
3.4.3.5	Pendaratan Pesawat	47
3.4.4	Pemrosesan Data	47
3.4.4.1	Orientasi Dalaman	48

3.4.4.2	Orientasi Relatif	48
3.4.4.3	Orientasi Mutlak, Ortofoto dan Model Paramuka Berdigit	50
3.5	Hasil dan Perbincangan	52
3.6	Analisis	52
3.6.1	Imej Individu/Fotoudara	53
3.6.2	Hasil	54
3.7	Kawasan Kajian	55
3.8	Ujian Kalibrasi Kamera	56
3.9	Ujian Konfigurasi Kamera	58
3.10	Ujian Ketinggian Penerbangan	60
3.11	Ujian Titik Kawalan Bumi (GCP)	61
3.12	Ujian Liputan Pengambaran	62
<b>BAB 4</b>	<b>HASIL DAN ANALISA</b>	<b>65</b>
4.1	Pengenalan	65
4.2	Penilaian Hasil Kalibrasi Kamera Digital Kompak untuk UAV	65
4.2.1	Kalibrasi Makmal	66
4.3	Penilaian Keupayaan Kamera Digital Kompak sebagai Sensor UAV	67
4.3.1	Kesan ISO (Tahap Sensitiviti Cahaya)	67
4.3.1.1	Tetapan Kamera	68
4.3.1.2	Visualisasi Ortofoto	68
4.3.1.3	Penilaian Ketepatan Planimetri (X/Y)	69
4.3.1.4	Penilaian Ketepatan Ketinggian (Z)	71
4.3.2	Kesan Pemulihan Imej pada Ketepatan Ortofoto	72
4.3.2.1	Tetapan Kamera	72
4.3.2.2	Visualisasi Ortofoto	73



4.3.2.3	Penilaian Ketepatan Ortofoto	74
4.3.2.4	Penilaian Ketepatan Ketinggian	76
4.3.3	Kesan Exposure Time (Sela Dedahan)	77
4.3.3.1	Visualisasi Ortofoto	77
4.3.3.2	Ketepatan Ortofoto	78
4.4	Penilaian Ketepatan & Visualisasi Ortofoto & DTM berdasarkan Jenis Paramuka	80
4.4.1	Kawasan Tumbuhan	80
4.4.1.1	Ketepatan Ortofoto dan DTM	80
4.4.1.2	Ketepatan DTM/Kontur	81
4.4.1.3	Visualisasi Kontur	83
4.4.1.4	Visualisasi Ortofoto	85
4.4.1.5	Visualisasi DTM	87
4.4.1.6	Visualisasi Peta Ortofoto	88
4.4.2	Kawasan Bangunan	88
4.4.2.1	Ketepatan Ortofoto Merujuk GPS	89
4.4.2.2	Ketepatan Ortofoto Merujuk Tekimetri	90
4.4.2.3	Visualisasi Dimensi Bangunan	92
4.5	Penilaian Ketepatan Ortofoto & DTM berdasarkan Perbezaan Altitud Penerbangan	93
4.5.1	Kedudukan Titik Kawalan Bumi (GCP)	94
4.5.2	Ketepatan Pemetaan	95
4.5.3	Visualisasi Ortofoto	98
4.5.4	Visualisasi Peta Topografi Skala Besar	100
4.6	Ketepatan Photogrammetric Berdasarkan Pelbagai Konfigurasi GCP	102
4.6.1	Ketepatan Photogrammetric Berdasarkan Konfigurasi corak GCP	102
4.6.2	Ketepatan Photogrammetric Berdasarkan Kuantiti GCP	104

<b>BAB 5</b>	<b>KESIMPULAN DAN CADANGAN</b>	<b>107</b>
5.1	Pendahuluan	107
5.2	Kesimpulan	110
5.3	Sumbangan Kajian	112
5.4	Senarai Penerbitan	110
5.5	Senarai Anugerah	113
5.6	Keratan Akhbar	114
5.7	Cadangan	115
	<b>SENARAI DOKUMEN RUJUKAN</b>	<b>117</b>
	<b>LAMPIRAN A – J3</b>	<b>127</b>

## SENARAI JADUAL

<b>NO. JADUAL</b>	<b>TAJUK</b>	<b>MUKA SURAT</b>
Jadual 2.1	Keupayaan platform UAV berdasarkan kajian penyelidikan Geomatik.	20
Jadual 2.2	Garis Panduan UAV mengikut Negara	23
Jadual 2.3	Contoh UAV yang sering digunakan dalam Geomatik	29
Jadual 3.1	Spesifikasi UAV Mikro Helang	35
Jadual 3.2	Spesifikasi Canon Powershot SX230 HS	39
Jadual 4.1	Hasil Kalibrasi Kamera pada Altitud 100 meter	66
Jadual 4.2	Hasil Kalibrasi Kamera pada Altitud 200 meter	66
Jadual 4.3	Hasil Kalibrasi Kamera pada Altitud 300 meter	66
Jadual 4.4	Tetapan Kamera	68
Jadual 4.5	Penilaian ketepatan Ortofoto yang dijana daripada imej ISO 200	69
Jadual 4.6	Penilaian ketepatan Ortofoto yang dijana daripada imej ISO 100	70
Jadual 4.7	Penilaian ketepatan RMSE Koordinat U/S dan T/B Ortofoto ISO100 dan ISO200	70
Jadual 4.8	Ketepatan Piawai Koordinat Fotogrametri ASPRS	71
Jadual 4.9	Penilaian Ketepatan Ketinggian Janaan berbanding Ketinggian Geodetik	71
Jadual 4.10	Ketepatan Piawai Ketinggian Topografi ASPRS	72
Jadual 4.11	Tetapan kamera untuk Imej Kurang Dedahan	73
Jadual 4.12	Perbandingan Koordinat Ortofoto berasaskan Imej Pemulihan dengan Koordinat Geodetik	74
Jadual 4.13	Perbandingan Koordinat Ortofoto berasaskan Imej ISO100 (Kurang Dedahan) dengan Koordinat Geodetik	75

Jadual 4.14	Penilaian ketepatan RMSE Koordinat U/S dan T/B Ortofoto berasaskan imej ISO100 dan imej pemulihan	75
Jadual 4.15	Ketepatan Piawai Koordinat Fotogrametri ASPRS	76
Jadual 4.16	Penilaian ketepatan RMSE Koordinat Ketinggian DTM berasaskan Imej ISO100 dan Imej Pemulihan	76
Jadual 4.17	Ketepatan Koordinat Ortofoto dan DTM bagi Paramuka Tumbuhan berbanding Koordinat Geodetik RTK GPS	81
Jadual 4.18	Perbandingan ketepatan pengukuran kaedah UAV Fotogrametri berbanding LIDAR	83
Jadual 4.19	Taburan Titik Semak (VP)	89
Jadual 4.20	Penilaian Ketepatan Koordinat Ufuk dalam Skala 1: 2500	90
Jadual 4.21	Perbandingan pengukuran planimetri (U/S, T/B) blok akademik Al-Farabi 2	91
Jadual 4.22	Perbandingan ketinggian (z) bagi bangunan Al-Farabi 2	91
Jadual 4.23	Koordinat GCP yang digunakan dalam kajian ini	94
Jadual 4.24	Selisih latitud (y), longitud (x), dan ketinggian (z) bagi pendaftaran GCP	95
Jadual 4.25	Perbezaan Koordinat ufuk T/B (X), U/S (Y) dan aras Z bagi setiap Ortofoto dari UAV berbanding cerapan Geodetik	96
Jadual 4.26	Ketepatan pengukuran berasaskan corak taburan GCP	104
Jadual 4.27	Ringkasan Nilai RMSE bagi 4, 5 dan 7 bilangan GCP	106

## SENARAI RAJAH

NO. RAJAH	TAJUK	MUKA SURAT
Rajah 1.1	(a) Kamera udara di dalam pesawat udara berpemandu, (b) Pesawat udara berpemandu yang digunakan untuk perolehan imej, (c) Perolehan imej	2
Rajah 1.2	Contoh Pesawat Tanpa Pemandu (UAV) di pasaran untuk kegunaan awam dengan rekabentuk berbeza. (a) Kepak Rotor (b) Kepak Kaku	3
Rajah 1.3	Perolehan imej satelit yang terhad serta litupan awan pada imej	4
Rajah 1.4	Limitasi perolehan imej konvensional berbanding UAV	5
Rajah 1.5	Metodologi Kajian	9
Rajah 2.1	Peta Topografi	13
Rajah 2.2	Kedudukan Fotogrametri UAV di kalangan teknik pengukuran Geomatik yang lain	16
Rajah 2.3	Carta Alir proses Fotogrametri UAV	25
Rajah 2.4	Perbezaan mod penerbangan mempengaruhi kualiti rangkaian imej; (a) Mod manual (b) Sistem navigasi kos rendah (c) Mod Automatik.	26
Rajah 3.1	UAV Mikro Helang	34
Rajah 3.2	Komponen UAV Helang Ver II	36
Rajah 3.3	Sistem UAV Helang; (a) Sistem Kawalan Pesawat (b) Sistem Navigasi Pemetaan (c) Sistem Kawalan Bumi (GCS)	37
Rajah 3.4	Kamera Digital Canon Powershot SX230 HS (Atas); Kamera dimuatkan pada pemuat pesawat UAV Helang (Bawah)	38

Rajah 3.5	Penubuhan dan Penentuan Koordinat Titik Kawalan Bumi (GCP) menggunakan kaedah Sistem Penentududukan Sejagat (GPS)	41
Rajah 3.6	Rancangan penerbangan menggunakan perisian MissionPlanner™	42
Rajah 3.7	Pemeriksaan alat kawalan jauh dan bahagian kawalan pesawat seperti servo, aileron kiri/kanan/belakang dan kemudi	43
Rajah 3.8	Pemeriksaan keseimbangan pesawat setelah dimasukkan muatan pada pemuat (payload)	44
Rajah 3.9	Kedudukan pesawat ditunjukkan perisian Mission Planner	45
Rajah 3.10	Prosedur perlepasan UAV Helang	45
Rajah 3.11	Paparan Telemetry UAV Helang	46
Rajah 3.12	Helang UAV setelah mendarat dengan bantuan tayar	47
Rajah 3.13	Proses orientasi dalaman menggunakan perisian Agisoft™; (a) Imej yang telah melalui proses <i>Align Photo</i> ; (b) Koordinat titik utama imej.	48
Rajah 3.14	Proses orientasi relatif menggunakan perisian Agisoft™	49
Rajah 3.15	Proses (a) menandakan kedudukan titik dan (b) menetapkan nilai GCP perisian Agisoft™	49
Rajah 3.16	Ortofoto kawasan Masjid UTM, Skudai~Perisian Global Mapper	50
Rajah 3.17	Model Paramuka Berdigit kawasan Masjid UTM, Skudai~Perisian ArcGIS	50
Rajah 3.18	Model Ketinggian Berdigit kawasan Masjid UTM, Skudai~ Perisian ArcGIS	51
Rajah 3.19	Pelbagai paparan model kawasan dalam perisian Agisoft™	51
Rajah 3.20	Imej yang diperolehi menggunakan platform UAV Helang	53
Rajah 3.21	Pembesaran imej Masjid UTM (a) 20% dan (b) 50%	54

Rajah 3.22	Kawasan Liputan UiTM Kampus Arau, Perlis	55
Rajah 3.23	Kawasan Liputan Tanah Rata, Cameron Highlands, Pahang	56
Rajah 3.24	Proses Ujian Kalibrasi Kamera	57
Rajah 3.25	Proses Ujian Konfigurasi Kamera	58
Rajah 3.26	Proses Ujian Ortofoto Dan DTM merujuk kepada Perbezaan Ketinggian Penerbangan	60
Rajah 3.27	Proses Ujian Ortofoto dan DTM berasaskan Titik Kawalan Bumi (GCP)	61
Rajah 3.28	Proses Ujian Ortofoto dan DTM berasaskan Liputan Pengambaran	63
Rajah 4.1	(A) Ortofoto ISO200 (B) Ortofoto ISO100	68
Rajah 4.2	(A) Ortofoto berasaskan Imej dengan ISO100 (B) Ortofoto berasaskan imej yang telah dipulihkan	73
Rajah 4.3	Produk Orthophoto untuk sela masa dedahan yang berbeza iaitu (A) Sela 4 saat dan (B) Sela 6 saat.	78
Rajah 4.4	Produk Orthophoto untuk sela masa dedahan yang berbeza iaitu (A) Sela 9 saat dan (B) Sela 12 saat.	78
Rajah 4.5	Pemerhatian terhadap menara Masjid An-Nur UiTM dalam bulatan; (A), sela 4 saat dan (B) sela 6 saat	79
Rajah 4.6	Pemerhatian terhadap menara Masjid An-Nur UiTM dalam bulatan; (C), sela 9 saat dan (D) sela 12 saat	79
Rajah 4.7	Perbandingan garisan kontur kaedah fotogrametri UAV dan LIDAR	82
Rajah 4.8	Kontur yang dijana menggunakan kaedah UAV Fotogrametri	84
Rajah 4.9	Kontur yang dijana menggunakan kaedah LIDAR	84
Rajah 4.10	Ortofoto yang dijana menggunakan berasaskan imej UAV	85
Rajah 4.11	Ortofoto yang dijana menggunakan data LIDAR	86
Rajah 4.12	Imej pembesaran Ortofoto berasaskan Imej UAV (A) Ortofoto berasaskan data LIDAR (B)	86
Rajah 4.13	DTM yang dihasilkan berasaskan imej UAV	87

Rajah 4.14	DTM yang dihasilkan berasaskan data LIDAR	87
Rajah 4.15	Peta Orthophoto Tanah Rata, Cameron Highlands	88
Rajah 4.16	Kedudukan Titik Semak (VP) Bangunan	89
Rajah 4.17	Perbandingan secara tindihan digital Tekimetri dan Fotogrametri	90
Rajah 4.18	Perbandingan Dimensi Bangunan Kaedah Langsung dan Fotogrametri	92
Rajah 4.19	Perbandingan antara Pengukuran Geodetik dan Fotogrametri	93
Rajah 4.20	Kedudukan GCP untuk setiap altitud penerbangan	94
Rajah 4.21	Ketepatan planimetri X dan Y bagi setiap ketinggian	97
Rajah 4.22	Perbandingan ketepatan RMSE untuk Ketinggian	97
Rajah 4.23	Ortofoto berasaskan imej ketinggian 100 meter	98
Rajah 4.24	Ortofoto berasaskan imej ketinggian 200 meter	99
Rajah 4.25	Ortofoto berasaskan imej ketinggian 300 meter	99
Rajah 4.26	Peta Topografi Berasaskan Imej Altitud Penerbangan 100 m	100
Rajah 4.27	Peta Topografi Berasaskan Imej Altitud Penerbangan 200 m	101
Rajah 4.28	Peta Topografi Berasaskan Imej Altitud Penerbangan 300 m	101
Rajah 4.29	Perbezaan ketepatan RMSE konfigurasi GCP Seragam & Rawak untuk T/B	102
Rajah 4.30	Perbezaan ketepatan RMSE konfigurasi GCP Seragam & Rawak untuk U/S	102
Rajah 4.31	Perbezaan ketepatan RMSE konfigurasi GCP Seragam & Rawak untuk Ketinggian	103
Rajah 4.32	Perbandingan RMSE 4, 5 dan 7 bilangan CGP (T/B) meter	104
Rajah 4.33	Perbandingan RMSE 4, 5 dan 7 bilangan CGP (U/S) meter	105
Rajah 4.34	Perbandingan RMSE 4, 5 dan 7 bilangan CGP (Z)	105



## SENARAI ISTILAH

<b>Bahasa Inggeris</b>		<b>Bahasa Melayu</b>
Bundle Adjustment	-	Pelarasan Bundle
Calibration	-	Kalibrasi
Flight Planning	-	Rancangan Penerbangan
Camera Exposure	-	Dedahan Kamera
Camera Setting	-	Penetapan Kamera
Control Point	-	Titik Kawalan
Digital Camera	-	Kamera Digital
Focal Length	-	Jarak Fokus
Image Restoration	-	Pemulihan Imej
Marking Point	-	Titik Penandaan
Metric Camera	-	Kamera Metrik
Photogrammetry	-	Fotogrametri
Pixel	-	Piksel
Platform	-	Platfom
Payload	-	Pemuat
Sensor	-	Penderia
Shutter Speed	-	Kelajuan Pengatup
Surface	-	Permukaan
Test field	-	Medan Ujian
Three-Dimensional (3D)	-	Tiga Dimensi
Total Station	-	Total Station
Triangulation	-	Triangulasi
Two-Dimensional (2D)	-	Dua Dimensi
Wireframe	-	Kerangka

## SENARAI SIMBOL

$S$	-	Nilai skala
$a$	-	Nilai penderia imej
$A$	-	Nilai bes kamera
$f$	-	Nilai jarak fokus bagi kamera
$H$	-	Nilai jarak dari objek ke kamera bes
$(x,y,z)$	-	Koordinat x, y dan z
$\sigma$	-	Sisihan piawai
$\mu$	-	Min (purata)

## SENARAI LAMPIRAN

<b>LAMPIRAN</b>	<b>TAJUK</b>	<b>MUKA SURAT</b>
Lampiran A	Prosedur Pemprosesan Imej Udara Perisian Agisoft Photoscan Professional	127
Lampiran B	Prosedur Pemprosesan Data GPS Topcon Tool	141
Lampiran C	Prosedur Pemprosesan Penukaran Koordinat Unjuran Perisian ArcGIS	148
Lampiran D1	Laporan Kalibrasi Kamera Canon PowerShot SX230 HS – 100 meter	152
Lampiran D2	Laporan Kalibrasi Kamera Canon PowerShot SX230 HS – 200 meter	153
Lampiran D3	Laporan Kalibrasi Kamera Canon PowerShot SX230 HS – 300 meter	154
Lampiran E	Penilaian ketepatan Ortofoto dan DTM Berasaskan Konfigurasi Kamera	155
Lampiran F	Penilaian ketepatan Ortofoto dan DTM Berasaskan Paramuka Tumbuhan	163
Lampiran G	Peta Ortofoto Tanah Rata, Cameron Highlands, Pahang	164
Lampiran H	Penilaian ketepatan Ortofoto dan DTM Berasaskan Paramuka Bangunan	165
Lampiran I1	Hasil Ortofoto daripada Ketinggian Penerbangan 100 m	169
Lampiran I2	Hasil Ortofoto daripada Ketinggian Penerbangan 200 m	170
Lampiran I3	Hasil Ortofoto daripada Ketinggian Penerbangan 300 m	171
Lampiran J1	Hasil Plan Butiran daripada Ketinggian Penerbangan 100 m	172
Lampiran J2	Hasil Plan Butiran daripada Ketinggian Penerbangan 200 m	173

Lampiran J3 Hasil Plan Butiran daripada Ketinggian  
Penerbangan 300 m

174

# BAB 1

## PENGENALAN

### 1.1 Pendahuluan

Kepesatan permintaan maklumat geografi atau geoinformasi dalam kehidupan seharian semakin bertambah sejak sedekad yang lalu seiring dengan kemajuan sistem maklumat yang ada kini. Dua dekad yang lalu sehinggalah kini, penggunaan pesawat udara berpemandu sebagai platform perolehan imej seperti Rajah 1.1 nyata memberi manfaat kepada teknologi maklumat geografi khususnya dalam penyediaan peta topografi. Bermula dari era analog melalui penggunaan kamera analog kini berubah kepada era digital melalui penggunaan kamera digital. Sinonim dengan nama pemetaan udara atau pemetaan topografi udara, fotogrametri udara terus mendapat tempat sehingga kini untuk kerja-kerja perolehan data (Lemmens, 2011a). Walaupun wujud beberapa platform baru seperti satelit *Remote Sensing* dan *Radar*, platform pesawat udara berpemandu tetap mempunyai keunikannya tersendiri sebagai platform perolehan imej untuk tujuan pemetaan. Selain dari kamera, platform pada pesawat tersebut juga turut dijadikan platform untuk pengimbas laser atau kombinasi keduanya bagi tujuan perolehan imej. Kaedah ini sinonim dengan panggilan *LiDAR*.



Rajah 1.1 (a) Kamera udara di dalam pesawat udara berpemandu, (b) Pesawat udara berpemandu yang digunakan untuk perolehan imej, (c) Perolehan imej (Kimball, 2011)

Sejak berabad dulu kaedah fotogrametri udara digunakan dalam penghasilan produk pemetaan seperti peta garis yang lebih dikenali sebagai peta topografi. Produk pemetaan dari kaedah fotogrametri udara seperti peta garis, ortofoto, model paramuka berdigit dan mozek sering mendapat permintaan samada untuk kegunaan ketenteraan atau awam (Podobnikar, 2009). Kepesatan sistem geoinformasi dalam menyalurkan maklumat kepada pengguna amat mendesak kepada keperluan data yang bersifat terkini dan dikemaskini. Seringkali kedengaran pertanyaan, bagaimana, sejauh mana cepatnya, keberkesanan, murah atau mahal setiap platform tersebut dalam proses perolehan data in-situ untuk sesuatu aplikasi. Ini menjadi satu cabaran kepada penyelidik untuk mencari kepada penyelesaian atau jawapan kepada soalan-soalan tersebut (Lemmens, 2011b).

Bermula dari pesawat terpakai, diterbangkan tanpa hadirnya juruterbang atau krew di dalam pesawat, tanpa diketahui umum tahun 1916 sewaktu perang dunia pertama menyaksikan kenderaan unik ini digunakan untuk tujuan ketenteraan terutamanya dalam kerja-kerja tinjauan kawasan musuh dan lain-lain kerja yang berkaitan. Membuka mata masyarakat akan kepentingan atau keperluannya dalam kehidupan seharian selepas menjadi tajuk utama sewaktu peristiwa serangan penganas menggunakan pesawat tersebut ke atas aset utama US pada 11 September 2001 atau 9/11. Kini US mendahului senarai pengeluar utama dunia untuk pesawat tersebut samada untuk kegunaan ketenteraan ataupun awam (Valanavis, 2007).

Terkini, Pesawat Tanpa Pemandu tersebut atau sinonim dengan panggilan *Unmanned Aerial Vehicle* atau dengan akronim *UAV* seperti Rajah 1.2 telah didatangkan dalam bentuk binaan yang ringan serta berupaya untuk melaksanakan kerja-kerja fotogrametri udara dengan kos yang rendah di atas kawasan kecil, dan jika dibandingkan dengan pesawat dengan pemandu, UAV mampu memasuki mana-mana kawasan berisiko/bencana dengan altitud yang rendah tanpa membahayakan nyawa orang awam atau harta awam (Eisenbeiss, 2009).

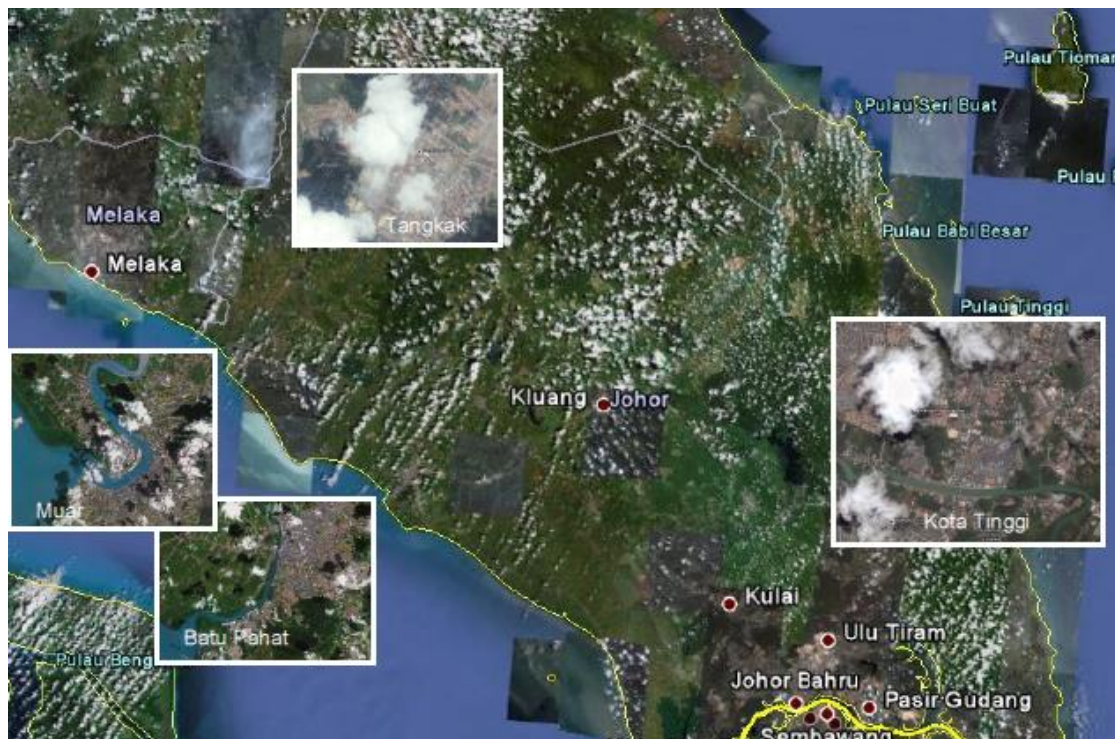


Rajah 1.2 Contoh Pesawat Tanpa Pemandu (UAV) di pasaran untuk kegunaan awam dengan rekabentuk berbeza. (a) Kepak Rotor (b) Kepak Kaku

Seiring dengan penciptaan penderia imej digital bersaiz kecil serta kemajuan sistem navigasi dan orientasi INS/GNSS (Brown *et al.*, 2006), UAV telah terbukti, sangat sesuai untuk kerja-kerja dengan kos yang efektif dalam perolehan data geografi bagi tujuan pengukuran dan pemetaan (Ajayi *et al.*, 2017; Cook, 2017, Sammartano dan Spanò, 2016; Chiabrando *et al.*, 2011 & 2012 ; Ahmad A. *et al.*, 2014; Ahmad A. *et al.*, 2014; Grun. *et al.*, 2012; Eisenbeiss, 2006).

## 1.2 Pernyataan Masalah




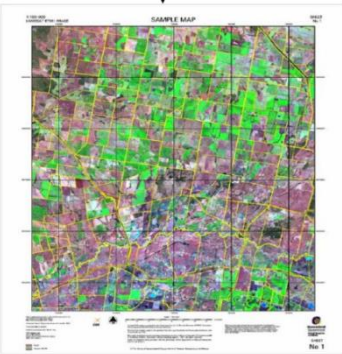

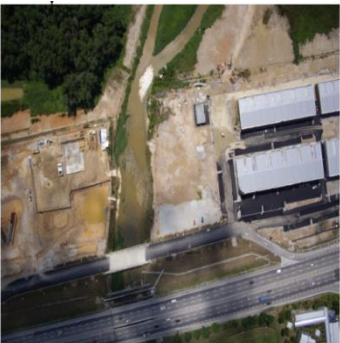
Dua dekad yang lalu, satu-satunya platform komersial bagi tujuan perolehan imej terhadap kawasan yang luas adalah pesawat udara dengan pemandu. Biasanya altitud penerbangan bagi tujuan tersebut antara 500 meter sehingga 10,000 meter. Kemunculan satelit *Remote Sensing* sebagai platform perolehan imej memperlihatkan perubahan altitud cerapan kepada 500 km sehingga 1000 km. Bagaimanapun, liputan imej satelit adalah terhad dan sangat terkawal dengan kos perolehan yang tinggi. Bagi pengguna yang terdesak, laman sesawang *Google* ada menyediakan kemudahan capaian imej satelit, tetapi ianya didatangkan dalam resolusi yang rendah serta tidak terkini. Selain daripada itu, masalah imej dilitupi awan turut menjadikan imej satelit sukar dicerap atau ditafsir untuk tujuan pemetaan seperti Rajah 1.3. Untuk mendapatkan imej beresolusi tinggi terutamanya untuk tujuan pemetaan, kenderaan udara ringan dan helikopter digunakan.



Rajah 1.3 Perolehan imej satelit yang terhad serta liputan awan pada imej



Keupayaan pesawat udara dengan juruterbang sebagai platform dalam pemetaan udara kaedah Fotogrametri udara tidak dapat dinafikan sejak dahulu lagi dalam perolehan maklumat radiometri untuk keseluruhan kawasan pemetaan berbanding kaedah seperti ukur teodolit, fotogrametri jarak dekat dan pengimbas laser terrestrial. Namun, kos penggambaran udara melibatkan pesawat tersebut adalah terlalu tinggi serta tidak efektif untuk projek berskala besar atau yang melibatkan kawasan kecil seperti Rajah 1.4.

Satelit Remote Sensing	Kenderaan Udara Ringan	UAV
		
Altitud 500 – 1000 km	Altitud 0.5 km – 10 km	Altitud 0.1 km – 1 km
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistem Satelit Remote Sensing</li> <li>- Resolusi &gt; 50cm</li> <li>- Liputan Besar</li> <li>- Kos Medium - Tinggi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistem Kamera Udara Digital/SAR/LIDAR</li> <li>- Resolusi 5cm - 100cm</li> <li>- Liputan Medium - Besar</li> <li>- Kos Tinggi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistem Kamera Digital Kompak</li> <li>- Resolusi &lt; 5 cm</li> <li>- Liputan Kecil - Medium</li> <li>- Kos Rendah</li> </ul>
		
90 km x 30 km	3 km x 3 km	0.2 km x 0.2 km

Rajah 1.4 Limitasi perolehan imej konvensional berbanding UAV

Altitud penerbangan kenderaan udara yang dilengkapi dengan kamera udara juga menjadi halangan untuk perolehan imej bagi tujuan penyediaan peta berskala besar (lebih dari 1:500). Larangan penerbangan terhadap sesetengah kawasan seperti kawasan pemuliharaan arkeologi yang mana turut menjadi halangan kepada platform ini untuk melakukan perolehan data (Chiabrande *et al*, 2011). Atas alasan tersebut, penggunaan UAV bagi perolehan data terutamanya dalam bidang pemetaan khususnya di Malaysia harus dimanfaatkan secara efektif. Penggunaan platform UAV untuk pemetaan terutamanya dalam pemetaan topografi masih lagi dilihat sebagai satu pendekatan baru di negara ini, walaupun sebenarnya bidang ini telah jauh kematangannya melalui proses perkembangan yang pesat seiring dengan perkembangan teknologi terkini. Di antara faktor-faktor yang menjadikan UAV sebagai satu pendekatan baru ialah sistem (perkakasan dan perisian) yang dibangunkan memerlukan pengguna yang terlatih untuk mengoperasikannya (Lemmens, 2011b).

UAV dioperasikan secara kawalan jauh samada secara separa-automatik atau automatik sepenuhnya. Walaupun ianya boleh dioperasikan secara automatik sepenuhnya, proses perlepasan dan pendaratan memerlukan operator yang mahir untuk menghadapi apa jua kemungkinan sewaktu proses tersebut. Bagi pengguna yang menggunakan sistem kos rendah, proses perlepasan dan pendaratan kemungkinan hanya boleh dilakukan secara separa-automatik. Di sini fungsi pengguna yang mahir amat diperlukan dalam memastikan kejayaan setiap siri penerbangan (WITAS, 2009).

Proses penggambaran imej juga memerlukan kefahaman yang baik, pertama dari sudut fotogrametri dan yang kedua dari sudut keupayaan perkakasan yang ada pada sistem UAV sebagai platform serta yang ketiga keupayaan penderia untuk proses perolehan imej. Ketiga-tiga faktor tersebut saling berkait rapat antara satu sama lain bagi perolehan hasil pemetaan yang baik. Proses pemprosesan imej kaedah fotogrametri turut berkait langsung dengan faktor sewaktu penggambaran imej. Kegagalan memahami konsep fotogrametri terutamanya dalam proses perancangan penerbangan akan menyebabkan kegagalan dalam perolehan imej. Ini pasti akan turut menggagalkan proses pemprosesan data dan akan memberi kesan kepada ketepatan hasil pemetaan.

### **1.3 Matlamat Kajian**

Matlamat kajian ini adalah untuk menilai kesesuaian secara praktikaliti pemetaan topografi skala besar kaedah fotogrametri, berasaskan imej dari platform UAV Mikro Kepak Kaku dan kemudian menubuhkan prosedur pemetaan topografi skala besar kaedah fotogrametri UAV.

### **1.4 Objektif Kajian**

Bagi memenuhi matlamat kajian, objektif kajian ini terbahagi kepada tiga bahagian utama iaitu : -

- a) Melaksana kalibrasi kamera lapangan dan menilai ketepatan parameter kalibrasi kamera berasaskan perbezaan ketinggian penerbangan bagi kamera digital kompak
- b) Menilai keupayaan kamera digital kompak menggunakan platform UAV Mikro Kepak Kaku dalam perolehan imej udara bagi menjana Ortofoto dan Model Paramuka Berdigit
- c) Menilai ketepatan Ortofoto dan Model Paramuka Berdigit UAV Mikro Kepak Kaku berdasarkan perbezaan jenis permukaan bumi, konfigurasi Titik Kawalan Bumi (GCP) dan perbezaan ketinggian penerbangan

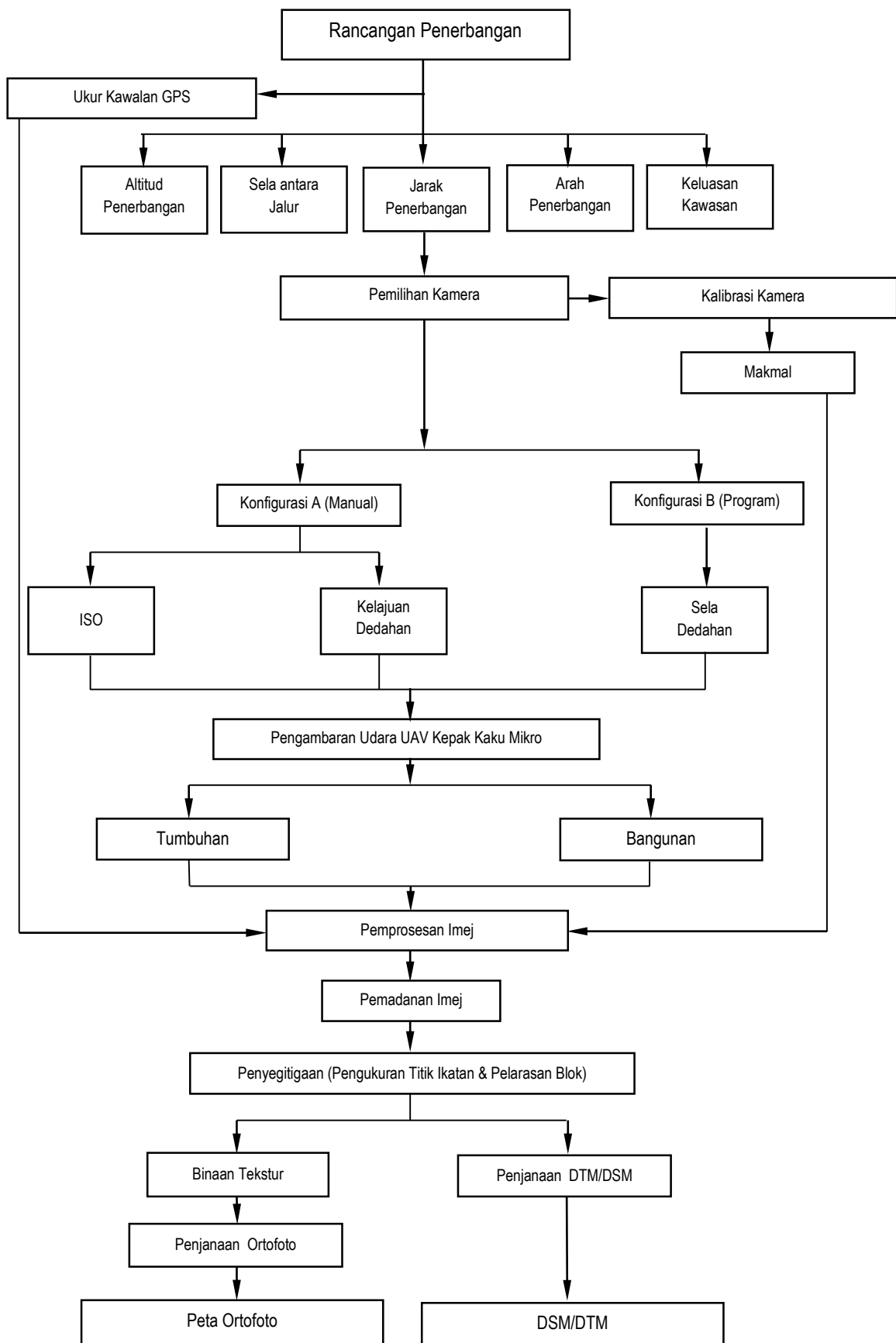
## 1.5 Skop Kajian

Kajian ini menekankan kepada penggunaan sistem UAV dalam bidang fotogrametri udara khususnya dalam penyediaan produk fotogrametri bagi tujuan pemetaan topografi. Bagi memperjelaskan lagi prosedur penggunaan UAV dalam bidang tersebut, yang mana merupakan matlamat utama kepada kajian ini, aspek penyelidikan akan merangkumi pemahaman komponen UAV itu sendiri, keupayaan dan keberkesanan UAV sebagai platform kepada perolehan imej. Bagi melengkapkan matlamat kajian, produk fotogrametri yang dihasilkan dari imej UAV akan dinilai dalam bentuk statistik dan visual.

Dalam kajian ini UAV yang digunakan adalah dari jenis UAV kepak kaku di bawah kategori kos rendah. Ianya dipasang oleh sebuah syarikat yang dilantik oleh UTM di bawah seliaan pensyarah penyelia mengikut spesifikasi yang diperlukan untuk kegunaan penyelidikan. Pesawat ini yang diberi nama “Helang” telah melalui beberapa ujian penerbangan sebelum boleh digunakan sebagai platform perolehan fotoudara untuk bidang fotogrametri. Bagi tujuan perolehan imej, kamera kompak digital dikalibrasi dan dimuatkan pada komponen pemuat di bahagian bawah UAV tersebut. Dalam kajian ini juga tiga kawasan iaitu tanah lapang, tanah dengan tumbuhan dan tanah dengan bangunan dijadikan sebagai kawasan ujian penerbangan UAV dan kawasan perolehan imej UAV untuk penjanaan produk fotogrametri bagi kajian ini.

Untuk penjanaan produk fotogrametri, imej dari UAV akan diproses menggunakan perisian fotogrametri digital yang didatangkan secara pakej dengan sistem UAV tersebut. Penilaian secara visual dan statistik dibuat dengan membandingkan data planimetri dan pugak produk tersebut berbanding kaedah konvensional sediaada seperti teodolit, pengimbas paser dan fotogrametri udara. Hasil akhir adalah merupakan prosedur kepada pemetaan menggunakan UAV.

## 1.6 Metodologi Kajian



Rajah 1.5 Metodologi Kajian

## 1.7 Sumbangan Kajian

Kajian ini diharap dapat memperjelaskan kepada individu atau kumpulan yang terlibat dengan pemetaan umumnya dan khususnya kepada ahli fotogrametri yang terlibat secara langsung atau tidak dengan UAV. Terkini, melalui penggunaan platform UAV, tiada lagi penggunaan format filem atau digital bersaiz besar berbanding pesawat dengan pemandu. Platform ini turut dimanfaatkan terhadap pemetaan bagi kawasan bersaiz kecil yang mana pastinya menjimatkan masa serta perbelanjaan. Ini pastinya menjadi berita baik kepada individu atau syarikat dengan bajet yang kecil.

Platform UAV seharusnya menjadi trend terkini organisasi dalam melakukan samada kerja penyelidikan atau projek. Dengan platform ini juga, penerbangan boleh dilakukan pada bila-bila masa dan pastinya kerja-kerja mengemaskini maklumat sesuatu kawasan dapat dilakukan dengan berkesan.

Antara lain, berikut adalah sumbangan kajian yang boleh dimanfaatkan oleh mana-mana individu, penyelidik serta organisasi yang terlibat dengan pemetaan umumnya dan khusus kepada yang terlibat dengan pemetaan fotogrametri.

- a) Memperkenalkan platform UAV sebagai satu kaedah perolehan data untuk pemetaan yang pastinya menjimatkan masa, wang dan tenaga.
- b) Menyediakan garis panduan pemetaan menggunakan UAV meliputi perancangan, bajet, kekangan dan pengurusan data.
- c) Menubuhkan kaedah pemprosesan data UAV untuk penghasilan produk pemetaan seperti Model Paramuka Berdigit dan Ortofoto
- d) Mengetengahkan secara tidak langsung akan kaedah alternatif pemetaan berbanding penggunaan pesawat dengan pemandu.
- e) Membuka kepada lebih banyak ruang dan peluang penyelidikan khususnya kepada bidang fotogrametri dan pemetaan secara umumnya.

## SENARAI DOKUMEN RUJUKAN

- Ajayi, O.G., Salubi, A.A., Angbas, A.F., Odigure, M.G., (2017) Generation of Accurate Digital Elevation Models From UAV Acquired Low Percentage Overlapping Images. *International Journal of Remote Sensing*. 8–10 (38), 3113–3134.
- American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), (2004) Committee of Standards “Lexicon of UAV/ROA Terminology”.
- Ahmad, A., Darwin, A. N., Akib, W. A., (2014) The Potential of Low Altitude Aerial Data for Large Scale Mapping. *Jurnal Teknologi*, 2014.
- Ahmad, A, Hashim. K. A., Darwin. N., Hafis, M. R., (2013) Digital aerial imagery of unmanned aerial vehicle for various applications. *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, 535-540.
- Bendea, H., Boccardo, P., Dequal, S., Giulio, Tonolo, F., Marenchino, D., Piras, M., (2008) Low Cost UAV for Post-Disaster Assessment. In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China*, 37(B1): 1373–1379.
- Berni, J.A.J., Zarco-Tejada, P.J., Suárez, L., Fereres, E., (2009) Thermal And Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle. *Trans Geosci Remote Sens* 47: 722–738.
- Brown, D.C., (1976) The Bundle Adjustment—progress and prospects. In: *International Archives of Photogrammetry*, 21(3).

- Brown, A., Holland, H., Lu, Y., (2006) Real-Time Web-Based Image Distribution Using An Airborne GPS/Inertial Image Server. *Proceedings of ION GNSS 2006, Fort Worth, TX, USA.*
- Chiabrando, F., Nex, F., Piatti, D., Rinaudo, F. (2011) UAV and RPV Systems for Photogrammetric Surveys in Archaeological Areas: Two Tests in The Piedmont Region (Italy). *Journal of Archaeological Science* 38 (2011) 697-710 doi:10.1016/j.jas.2010.10.022, ISSN: 0305-4403
- Chou, T.Y., Yeh, M.L., Chen, Y.C., Chen, Y.H., (2010) Disaster Monitoring and Management By The Unmanned Aerial Vehicle Technology. In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vienna, Austria, 38(7B):137-142*
- Colomina, I., Aigner, E., Agea, A., Pereira, M., Vitoria, T., Jarauta, R., Pascual, J., Ventura, J., Sastre, J., Brechbühler, Pinho, G., Derani, A., Hasegawa, J., (2007) The uVISION project for helicopter-UAV photogrammetry and remote-sensing. *Proc. of the 7th International Geomatic Week, Barcelona, Spain*
- Colomina, I., Blázquez, M., Molina, P., Parés, M. E. and Wis, M., 2008. Towards A New Paradigm for High-Resolution Low-Cost Photogrammetry and Remote Sensing, In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Congress, Beijing, China, XXXVII. Part B1, 1201-1206.*
- Cook, K.L., 2017. An Evaluation of The Effectiveness of Low-Cost Uavs And Structure From Motion for Geomorphic Change Detection. *Geomorphology* 278, 195-208. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.009>
- Cramer, M., Bovet, S., Gültlinger, M., Honkavaara, E., McGill, A., Rijdsdijk, M. Tabor, M., Tournadre, V., 2013. On the use of RPAS in national mapping—the EuroSDR point of view. *ISPRS – Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci.* XL-1/W2, 93-99.



- Cunningham, K., Walker, G., Stahlke, E., Wilson, R., 2011. Cadastral Audit and Assessments Using Unmanned Aerial Systems. *ISPRS – Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci.* XXXVIII-1/C2, 213–216.
- Dickerson, L., “UAVs on the Rise”, *Aviation Week & Space Technology, Aerospace Source Book* 2007, Vol. 166, No. 3, January 15 2007.
- Dickey, Parke, A., (1985). "Who discovered Mount Everest?". *Eos.* **66** (41): 54–59. Retrieved 26 June 2011.
- Eisenbeiss, H., (2009) UAV photogrammetry. Dissertation ETH No. 18515, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland, *Mitteilungen* 105
- Eisenbeiss, H., Zhand, L., 2006. Comparison of DSM Generated From Mini UAV Imagery and Terrestrial Laser Scanner in a Cultural Heritage Application. In: *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Dresden, Germany, Vol. XXXVI part 5.
- Everaerts, J., 2008. The Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVS) for Remote Sensing and Mapping, In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Congress, Beijing, China*, XXXVII. Part B1, 1187-1192.
- Eyndt, T., Volkmann, W., 2013. UAS As a Tool for Surveyors: From Tripods and Trucks to Virtual Surveying. *GIM Int.* 27, 20–25.
- Franceschini, N., Ruffier, F., Serres, J., (2007) A Bio-Inspired Flying Robot Sheds Light on Insect Piloting Abilities. *Curr Biol* 17(4):329–335
- Government of Canada (2016). *National Topographic System Maps. Earth Sciences – Geography*. Natural Resources Canada. Archived from the original on 15 May 2016. Retrieved 16 May 2016.

- Grenzdörffer, G.J., Engel, A., Teichert, B., (2008) The Photogrammetric Potential of Low-Cost UAVS In Forestry and Agriculture. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China*, 2008 37(B1): 1207–1213
- Gruen, A., Beyer, H.A., (2001) System Calibration Through Self-Calibration. Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision. In: Gruen H (ed) *Springer Series in Information Sciences.*, pp 163–194
- Grün, A., Zhang, Z., Eisenbeiss, H., 2012. UAV Photogrammetry in Remote Areas 3D Modeling of Drapham Dzong, Bhutan. *ISPRS – Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci.* XXXIX-B1, 375–379.
- Guedj, D., *Le Theoreme du Perroquet*, Editions du Seuil, 1998.
- Gülch, E., 2012. Photogrammetric Measurements in Fixed Wing UAV Imagery. *ISPRS – Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci.* XXXIX-B1, 381–386.
- Haarbrink, H., Koers, E., 2006. Helicopter UAV for Photogrammetry and Rapid Response. *Proceedings of the 2nd International Workshop: The Future of Remote Sensing. VITO and ISPRS Intercommission Working Group I/V Autonomous Navigation, Antwerp, Belgium*, 36(1/W44).
- Hartmann, W., Tilch H.S., Eisenbeiss, H., Schindler, K., (2012) Determination Of The UAV Position By Automatic Processing of Thermal Images. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Melbourne, Australia*, 39(5).
- Harwin, S., Lucieer, A., 2012. Assessing The Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. *Remote Sens.* 4, 1573–1599.

- Huckridge, D.A., Ebert RR (2008) Miniature Imaging Devices for Airborne Platforms. *Proc SPIE* 7113:71130M, doi: 10.1117/12.799635
- Hurst Paul., (2010). *Will we be lost without paper maps in the digital age?* (PDF) (M.S. thesis), U.K.: University of Sheffield, pp. 1–18, archived from the original (PDF) on 2 October 2011, retrieved 1 July 2011
- Khairil, A. H., Anuar, A., Manan, S., (2012) Integration of Low Altitude Aerial and Terrestrial Photogrammetry Data in 3D Heritage Building Modeling. *Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC) 2012, Selangor, Malaysia;* M/S 225 – 230 ISBN 978-1-4673-2035-1 DOI 10.1109/ICSGRC.2012.6287166
- Kimball, L.R., (2011) Aerial Photographic Equipment. *CDI Infrastructure, LLC*
- Konolige, K., Agrawal, M., (2008) Frameslam: From Bundle Adjustment to Realtime Visual Mapping. *IEEE J Robot Autom* 24(5):1066–1077
- Krzystek, P., 1991. Fully Automatic Measurement of Digital Elevation Models With MATCH-T. In: 43rd *Photogrammetric Week*. Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany, pp. 203–214.
- Lambers, K., Eisenbeiss, H., Sauerbier, M., Kupferschmidt, D., Gaisecker, T., Sotoodeh, S., Hanusch, T., (2007) Combining Photogrammetry and Laser Scanning for The Recording and Modeling of The Late Intermediate Period Site of Pinchango Alto, Palpa, Peru. *J Archaeol Sci* 34(10):1702–1712
- Lemmens, M., (2011a) Digital Photogrammetric Workstations. *GIM Int* 25(12).
- Lemmens, M., (2011b) Geo-information Technologies, Applications and the Environment. *Journal of Geotechnologies and the Environment*, Vol 5
- Library of Congress., (2017) Geography and Maps: General Collections. Archived 16 September 2017 at the Wayback Machine.

- Lyon D. H., (2004) “A *Military Perspective on Small Unmanned Aerial Vehicles*”, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, pp: 27-31, September 2004.
- Manyoky, M., Theiler, P., Steudler, D., Eisenbeiss, H., (2011) Unmanned Aerial Vehicle in Cadastral Applications. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Zurich, Switzerland, 38 (1/C22)
- Martinez, J. R., Merino, L., Caballero, F., Ollero, A., Viegas, D.X., (2006) Experimental Results of Automatic Fire Detection and Monitoring with UAVs. *For Ecol Manag* 234S(2006):S232
- Martinez, Rubio, J. *et al.*, (2005) IMAP3D: Low Cost Photogrammetry for Cultural Heritage. *Proceedings of CIPA2005 XX International Symposium*, Torino, Italy.
- Mayr, W., (2011). UAV Mapping—A User Report. ISPRS – *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci.* XXXVIII-1/C22, 277–282.
- Meier, L., Tanskanen, P., Fraundorfer, F., Pollefeys, M., (2011) The PIXHAWK Open-Source Computer Vision Framework for MAVS. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Zurich, Switzerland, 38(1/C22)
- Molina, P., Colomina, I., Vitoria, T., Silva, P.F., Skaloud, J., Kornus, W., Prades, R., Aguilera, C., (2012) Searching Lost People With UAVS: The System and Results of The Close-Search Project. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Melbourne, Australia, 39(1)
- Moore, R.D., Thurrowgood, S., Soccol, D., Bland, D., Srinivasan, M.V., (2011) A Bio-Inspired Stereo Vision System for Guidance Of Autonomous Aircraft. In *AsimBhatti (Ed.) Advances in theory and applications of stereo vision*. Rijeka, Croatia: *InTech*. pp. 305–326

- National Air and Space Museum, (2004) *Centennial of Flight*, July 2004. Available at: <http://www.centennialofflight.gov/index.htm>.
- Neitzel, F., Klonowski, J., (2011). Mobile 3D mapping with low-cost UAV system. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Zurich, Switzerland*, 38 (1/C22)
- Newcombe, L., (2007) Green Fingered UAVs. Unmanned Vehicle. November 2007.
- Niethammer, U., Rothmund, S., James, M.R., Traveletti, J., Joswig, M., (2010) UAV-Based Remote Sensing of Landslides. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Newcastle upon Tyne, UK*, 38 (5)
- Nuechter, A., Lingemann, K., Hertzberg, J., Surmann, H., (2007) 6D SLAM for 3D mapping outdoor environments. *J Field Robot (JFR) Spec Issue Quant Perform Eval Robot Intell Syst* 24(8–9):699–722
- Oczipka, M., Bemman, J., Piezonka, H., Munkabayar, J., Ahrens, B., Achtelik, M., Lehmann, F., (2009) Small drones for geo-archeology in the steppes: locating and documenting the archeological heritage of the Orkhon Valley in Mongolia. *Remote Sens Environ Monit GIS Appl Geol* 7874:787406-1
- OSD, (2007) UAV Roadmap 2002-2027, *Office of the Secretary of Defense (Acquisition, Technology, & Logistics)*, *Air Warfare*, December 2002
- Peter Barber (2005), *The Map Book*, Weidenfeld & Nicolson, 2005, ISBN 0-297-84372-9, pp. 232, 250.
- Podobnikar, T., (2009) Methods for Visual Quality Assessment of a Digital Terrain Model. S.A.P.I.E.N.S [Online], 2.2 | 2009, Online since 29 January 2009, Connection on 10 October 2012. URL : <http://sapiens.revues.org/738>

- Przybilla, H.J., Wester-Ebbinghaus, W., (1979) Aerial Flight with Remote-Controlled Small Aircraft. *Image Measurement and Aerial Photography. Magazine for Photogrammetry and Remote Sensing.* Herbert Wichman Verlag, Karlsruhe.
- Pueschel, H., Sauerbier, M., Eisenbeiss, H., (2008) A 3D model of Castle Landenberg (CH) from combined photogrammetric processing of terrestrial and UAV-based images. In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.*, pp 96–98, Beijing, China
- Puri, A., Valavanis, P., Kontitsis, M., (2007) Statistical profile generation for traffic monitoring using real-time UAV based video data. *Mediterranean Conference on Control & Automation, Athens, Greece.*
- Qin, R., Grün, A., Huang, X., (2013) UAV Project – Building a Reality-Based 3D Model. *Coordinates* 9, 18–26
- Remondino, F., Fraser, C., (2006) Digital cameras calibration methods: considerations and comparisons. *Int Arch Photogrammetry Remote Sensing Spatial Information Science* 36(5):266–272
- Remondino, F., Gruen, A., Von Schwerin, J., Eisenbeiss, H., Rizzi, A., Sauerbier, M., Richards-Rissetto, H., (2009) Multi-sensors 3D documentation of the Maya site of Copan. *Proc. of 22nd CIPA Symposium, Kyoto, Japan.*
- Réostas, A., (2006) Forest Fire Management Supporting by UAV Based Air Reconnaissance Results of Szendro Fire Department, Hungary. *1st International Symposium on Environment Identities and Mediterranean Area. 9-12 July 2006*
- Rinaudo, F., Chiabrando, F., Lingua, A., Spanò, A., (2012) Archaeological site monitoring: UAV photogrammetry could be an answer. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Melbourne, Australia*, 39(5)

- Sammartano, G., Spanò, A., (2016) DEM generation based on UAV photogrammetry data in critical areas. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management* (GISTAM 2016), pp.92–98
- Schafroth, D., Bouabdallah, S., Bermeas, C., Siegwart, R., (2009) From The Test Benches to The First Prototype of The Mufly Micro Helicopter. *J Intelligent Robotic System* 54(1–3):245–260
- Smith, J. G., Dehn, J., Hoblitt, R.P., La Husen, R.G., Lowenstern, J.B., Moran, S.C., McClelland, L., McGee, K.A., Nathenson, M., Okubo, P.G., Pallister, J.S., Poland, M.P., Power, J.A., Schneider, D.J., Sisson, T.W., (2009) *Volcano monitoring*. Geological Monitoring, Geological Society of America, Eds Young and Norby, 273–305, doi: 10.1130/2009
- Spanoudakis, P., Doitsidis, L., Tsourveloudis, N. C., Valavanis, K. P., (2003) “*Vertical Take-Off and Landing Vehicle Market Overview*”, *Unmanned Systems*, Vol. 21, No. 5, pp: 14-18, September/October 2003
- Stempfhuber, W., Buchholz, M., (2011) A Precise, Low-Cost RTK GNSS System for UAV Applications. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Zurich, Switzerland*, 38 (1/C22)
- Steven, W. Smith., (2013). *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists*. Elsevier Science. ISBN 9780080477329.
- Strasdat, H., Montiel, J.M.M., Davison, A. J., (2010) Scale Drift-Aware Largescale Monocular SLAM. *Robotics: Science and Systems*
- Thamm, H. P., Judex, M., (2006) The “Low cost drone”—An Interesting Tool for Process Monitoring in a High Spatial and Temporal Resolution. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Enschede, The Netherlands*, 36 (7)

- Triggs, W., McLauchlan, P., Hartley, R., Fitzgibbon, A., (2000) Bundle Adjustment – A Modern Synthesis. Eds W. Triggs, A. Zisserman, and R Szeliski *Vision Algorithms: Theory and Practice*, LNCS, Springer Verlag, pp. 298–375.
- U.S. Geological Survey (2007). *The United States Geological Survey: 1879-1989*. U.S. Geological Survey, U.S. Department of the Interior. 10 April 2000. Archived from the original on 2 July 2007. Retrieved 19 June 2007
- Valanavis, P. Kimon, (2007) *Advances in Unmanned Aerial Vehicles: State of the Art and the Road to Autonomy*. University of South Florida Tampa, Florida, USA
- Van Hinsberg, W., Rijdsdijk, M., Witteveen, W., (2013). UAS for Cadastral Applications: Testing Suitability for Boundary Identification in Urban Areas. *GIM Int.* 27, 20–25.
- Verhoeven, G.J.J., (2009) Providing an Archeological Bird’s-eye View—An Overall Picture of Ground—Based Means to Execute Low-Altitude Aerial Photography (LAAP) in Archeology. *Archaeol Prospect* 16: 233–249. doi:10.1002/arp.354
- Wikipedia, The free encyclopedia., (2018) [http://en.wikipedia.org/wiki/Main\\_Page](http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page)
- WITAS, (2009). WITAS - The Wallenberg Laboratory for research on Information Technology and Autonomous Systems corporate website, <http://www.ida.liu.se/ext/witas/>, (accessed April 8 2009).
- Zhang, C., (2008) An UAV-Based Photogrammetric Mapping System for Road Condition Assessment. *In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Beijing, China, 37*