

PENGGUNAAN TEKNOLOGI LiDAR DALAM PEMETAAN

Sr Hazri bin Hassan

Jabatan Ukur dan Pemetaan Malaysia (JUPEM)

(Artikel ini tidak pernah diterbitkan sebelum ini)

Abstrak

Industri pemetaan merupakan salah satu bidang yang sentiasa diberi perhatian bagi mengimbangi kepesatan pembangunan teknologi semasa. Penerapan teknologi *Light Detection and Ranging* (LiDAR) dalam industri pemetaan membuka satu dimensi perbincangan yang luas melibatkan pengguna industri mahupun ahli akademik. Teknologi LiDAR kini menjadi kaedah lazim bagi pengumpulan data topografi yang lebih cepat dan berkualiti tinggi berbanding kaedah pengumpulan data topografi secara konvensional. Data cerapan yang umumnya didalam bentuk titik berkepadatan tinggi (*point cloud*) juga boleh diaplikasikan dalam pelbagai kegunaan khususnya dalam bidang pemetaan dan analisa muka bumi. Oleh yang demikian, makalah ini akan membincangkan berkaitan teknologi LiDAR merangkumi maklumat asas atau prinsip teknologi LiDAR, perkembangan terkini kaedah LiDAR dan proses kerja yang terlibat dari sudut pandang Jabatan Ukur dan Pemetaan Malaysia (JUPEM).

Kata kunci : LiDAR, pemetaan

1. Pengenalan

Light Detection and Ranging (LiDAR) adalah teknik penginderaan jauh (*remote sensing*) aktif yang menggunakan konsep talaan cahaya sasaran laser

dan menganalisis cahaya pantulan (Toschi et al., 2018). Dengan mengenalpasti masa pantulan cahaya untuk setiap nadi kembali ke sensor, kedudukan dan ketinggian objek dapat diukur dalam ketepatan yang ditinggi berdasarkan formula asas seperti di Persamaan 1 (Yang et al., 2019). LiDAR telah menjadi satu kaedah penawanan data titik-titik berkepadatan tinggi (*point cloud*) yang tepat bagi sesuatu permukaan topografi berasaskan tiga dimensi (3D) (Young, 2011; Wang et al., 2018). Schmid et al. (2008) menyatakan bahawa koordinat 3D objek sasaran diperolehi daripada beberapa perkara antaranya (i) perbezaan masa pancaran dan pembalikan laser, (ii) sudut (*angle*) pancaran laser yang dihantar, dan (iii) lokasi alat pengesan seperti dalam Rajah 1.

$$D = r * t/2 \tag{1}$$

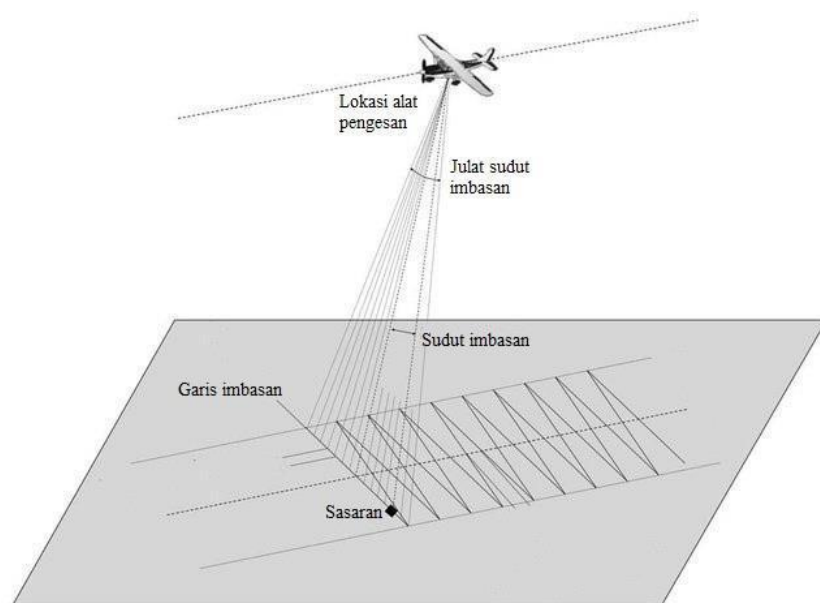
D = jarak dari sensor ke target objek

r = kadar kelajuan cahaya 3×10^8 m/s

t = masa yang diambil untuk nadi kembali ke sensor

2 = masa dibahagi dengan 2 kerana mengambilkira tempoh cahaya pergi

dan kembali ke sensor

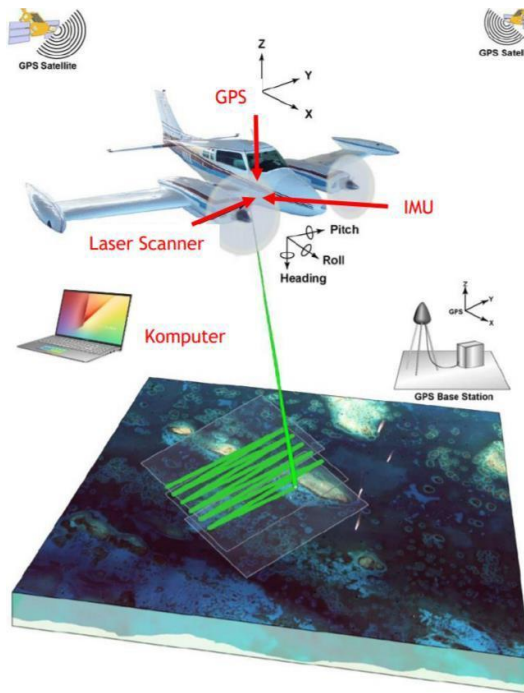


Rajah 1: Komponen-komponen cerapan data koordinat 3D

Sumber: Gatzolis et al. (2008)

Penggunaan pancaran cahaya laser yang tidak memerlukan cahaya matahari kerana ianya berasaskan penderiaan secara aktif dan boleh dijalankan sama ada pada waktu siang atau malam adalah amat sesuai untuk kerja ukur khususnya bagi tujuan kejuruteraan (Ren et al., 2020). Teknologi ini. Penghasilan data yang beresolusi tinggi dan tepat membolehkan aktiviti pemetaan yang lebih efisien dapat dijalankan bagi pelbagai tujuan seperti perancangan pembangunan, perwakilan 3D bagi struktur buatan manusia (permodelan jalan raya, jambatan, bangunan) dan lain-lain.

Secara umumnya, kaedah teknologi LiDAR mengandungi beberapa komponen seperti (i) pesawat (*aircraft*) bagi teknik penawanan di udara, (ii) alat pengesan (*sensor*), (iii) alat penerima *Global Navigation Satellite System* (GNSS), (iv) inersia pengukuran unit (IMU), dan (v) perkakasan komputer (Lohani & Ghosh, 2017) seperti dalam Rajah 2. Selain daripada itu, kebanyakan misi penerbangan juga dilengkapi dengan kamera digital bagi membekalkan imej rupa bumi. Data LiDAR yang dihasilkan akan membekalkan beberapa input penting seperti nilai koordinat x, y, dan z, nilai intensiti, dan jalur merah, hijau, dan biru yang lebih dikenali sebagai jalur RGB (Asvadi et al., 2016). Teknologi LiDAR kini diaplikasikan dipelbagai platform ukur seperti penggunaan alat pengimbas daratan (*terrestrial laser scanning* (TLS)), alat pengimbas udara (*airborne laser scanning* (ALS)) dan juga platform angkasa (*spaceborne*) (Paris et al., 2017).



Rajah 2: Komponen-komponen LiDAR

Sumber: Shih et al. (2008)

Bagi kaedah ALS, misi penerbangan pesawat beserta proses pengimbasan ke kawasan sasaran dengan membuat rangkaian garis penerbangan dalam corak grid (Paris et al., 2017). Ketumpatan titik yang dihasilkan bergantung pelbagai aspek seperti ketinggian penerbangan, kelajuan pesawat, jenis alat pengesan, dan sebagainya. Penggunaan TLS pula menghasilkan titik yang berketumpatan lebih tinggi dapat direkodkan berbanding ALS kerana jarak antara alat pengesan dan objek lebih dekat (Paris et al., 2017). Kebiasaanya, format titik LiDAR dihasilkan dalam pelbagai format seperti format *LASer* (.las) dan *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII). Fail tersebut seterusnya akan diproses menggunakan perisian tertentu sehingga menghasilkan produk yang boleh digunapakai dalam pelbagai aplikasi. Penulisan ini dibahagikan dua (2) bahagian bagi membincangkan beberapa aspek berkaitan LiDAR iaitu (i) evolusi teknologi LiDAR sama ada di peringkat dunia dan Jabatan Ukur dan Pemetaan

Malaysia (JUPEM), (ii) proses kerja (kaedah penawanan, pemprosesan dan analisis ketepatan).

2. Evolusi dan pengalaman JUPEM

2.1. Peringkat dunia

Peringkat awal pembangunan teknologi LiDAR bermula apabila Albert Einstein memperkenalkan teori cahaya laser pada tahun 1917 melalui majalah yang diterbitkan yang bertajuk *Zur Quantentheorie der Strahlung (On the Quantum Theory of Radiation)* (Einstein, 1917; Lippi et al., 2019). Kesenambungan daripada itu, pelbagai proses cubaan dalam makmal dan lapangan telah dijalankan bagi menguji kebolehpayaan laser khususnya mengukur aerosol stratosfera dan ketumpatan molekul di atmosfera (Diaz et al., 2017). Pada dekad 1950an, alat laser yang pertama telah dihasilkan dimana ia digunakan sebagai alat pencatat waktu dalam *atomic clocks* bagi pergerakan cahaya (McCarthy, 2017). Tanpa alat ini masa pergerakan cahaya pergi balik tidak dapat direkod. Seterusnya, prototaip LiDAR diperkenalkan pada tahun 1961 oleh Hughes Aircraft Company (Mehendale & Neoge, 2020). Pada tahun 1969 pula, telah muncul pembaharuan teknologi ALS dengan menggunakan helikopter sebagai platform dalam misi penerbangan dan telah digunapakai sehingga kini. Pada tahun 1968, teknologi LiDAR bagi tujuan pemetaan batimetri iaitu penentuan kedalaman kawasan badan air terutama kawasan laut telah diperkenalkan (Purkis, 2018). Walau bagaimanapun alat pertama khusus untuk *LiDAR* batimetri diperkenalkan pada 1973.

Seterusnya, semasa dekad 1970an, teknik LiDAR menggunakan *spaceborne* telah diperkenalkan. Kaedah ini diperkenalkan oleh Agensi Pentadbiran Angkasa Lepas dan Aeronautik Kebangsaan (NASA), Amerika Syarikat dimana tiga misi telah dilancarkan (Degnan, 2002; Weimer et al., 2017). Sekitar dekad 1980an, perkembangan teknologi GPS telah mula berkembang pesat bagi tujuan penentududukan. Pada tahun 1985, penerbangan LiDAR telah mula menggunakan teknologi GPS (Gao et al., 2015). Kombinasi antara GPS, IMU, dan lain-lain komponen memberi kelebihan dimana ketepatan dan resolusi data yang dihasilkan lebih tinggi. Pada dekad 1990an pula, kaedah TLS telah diperkenalkan dan kaedah ini menawarkan resolusi data sehingga sub-sentimeter dimana amat sesuai untuk mendapatkan imbasan 3D topografi, ciri semula jadi (tumbuh- tumbuhan, gua) dan sebagainya (Telling et al., 2017). Walau bagaimanapun, keupayaan perkakasan komputer yang tinggi diperlukan semasa proses pemprosesan.

Memasuki abad ke-20, *Leica* satu jenama terkenal dalam alatan ukur, telah membeli *Cyra Technology* pada 2001. Perisian *Cyclone* telah muncul pada era ini yang telah dibangunkan bersama *Hardware* turut dimiliki oleh pihak JUPEM. Pada waktu ini juga, telah banyak projek cerapan kepada objek atau butiran sejarah dilakukan seperti *Ancient Maya kingdom* atau Kerajaan Maya kuno antara tempat pilihan pengukuran data LiDAR pada 2009 dan 2016. Pada dekad 2010an, banyak tempat penting yang diukur menggunakan alat LiDAR antaranya Gua Tham Luang di Thailand. Pengetahuan tentang penggunaan teknologi LiDAR telah berkembang hanya selepas penyelamatan dibuat terhadap 13 mangsa yang terperangkap di gua tersebut (Bradley, 2019). Penyelamatan ini berdasarkan

Cave map “Expedition Thai-Maros 1986 and 1987” pengukuran gua yang dikendalikan oleh Juruukur dari Perancis termasuk juga penggunaan data *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) 2007 bagi melihat laluan masuk (GIM International, 2018). Memasuki tahun 2020, sebahagian besar aktiviti cerapan data yang melibatkan teknologi LiDAR terhenti seketika kerana hampir keseluruhan kawasan di dunia telah mengalami krisis akibat daripada situasi *Pandemik Covid-19* (Market Watch, 2020). Rangkuman kronologi perkembangan teknologi LiDAR di peringkat dunia boleh dilihat pada Rajah 3

1910	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010	2020
1917 Theoretical laser light 1930 Publish paper “Atmosphere Searchlight” 1935 Lab experiment 1937 Experiment 1939 Lab experiment	1953 Built Maser equipment 1958 Publish paper “Infrared & Optical Maser”	1960 Demonstrate laser 1961 Built prototype LiDAR 1962 Commercial LiDAR 1962 Project “LUNAR SEE” 1963 Build the SRI Mark I LiDAR 1964 Built satellite laser ranging on Beacon 22 1968 first bathymetric lidar 1969 Apollo Lunar Ranging from a helicopter Experiment (LURE) 1969 LiDAR from helicopter	1971 first LiDAR in space 1973 builds a bathymetric LiDAR 1974 Optech LiDAR 1975 Airborne Oceanographic LiDAR (AOL) program 1975 first devoted solely to satellite laser 1977 First flights Airborne Oceanographic Lidar (AOL). 1978 Riegl LiDAR	1981 Res-Tec LiDAR (now FARO) 1984 Coherent Technologies 1984 Optech’s LARSEN 500 - hydrographic chart 1985 Flying - use of GPS 1989 first laser-based police speed gun	1991 Airborne Topographic Mapper (ATM) - over Greenland 1993 Optech revolutionizes coastal mapping 1993 Cyra Technologies 1994 a full-waveform lidar 1995 Direct Dimensions. 1996 Shuttle Laser Altimeter 1999 Cyrax 2400, the first tripod-mounted	2001 Leica Geosystems buys Cyra Technologies. 2002 Simultaneous Location and Mapping (SLAM) software 2006 Earthmine 2007 Japan send lidars to the moon 2008 India send lidars to the moon 2009 Lunar Orbital Laser Altimeter 2009 Optech scan Carocol site (ancient Maya archaeological)	2002 fly lidar over Angkor in Cambodia 2014 upgrade U.S. elevation maps 2015 operate at 330 mph in a jet at 25,000 feet 2016 fly 14,000 square kilometers of Maya lowlands 2016 releases its Small UAS rule 2016 Lidar drones legal in US 2019 LiDAR at Tham Luang, Thailand	2020 World lockdown.

Rajah 3: Kronologi perkembangan teknologi LiDAR peringkat dunia

2.2. Peringkat JUPEM

Penggunaan LiDAR di JUPEM bermula dari tahun 2002 dengan menggunakan alat OPTECH ALTM 30/70 (ALS) dan CYRAX 2500 (TLS). Pada tahun 2013 dan 2014, aktiviti perolehan data LiDAR dilakukan di kawasan Wilayah Persekutuan Kuala Lumpur dan bagi pembangunan data SmartKADASTER (Isa et al., 2015). Aktiviti LiDAR semakin pesat dan banyak digunakan di JUPEM bermula dari tahun 2016 hingga ke 2019 dimana banyak perolehan data telah dilakukan dengan beberapa syarikat mula melabur dalam pembelian sensor LiDAR. Selain JUPEM,

terdapat juga agensi kerajaan dan bukan kerajaan yang turut mula terlibat didalam perolehan data ini. JUPEM juga merupakan *subject-matter expert* (SME) LiDAR bagi agensi kerajaan yang terlibat dengan mana-mana projek berkaitan dengan perolehan data LiDAR. Institut Tanah dan Ukur Negara (INSTUN), juga turut menyumbang dalam perkembangan aktiviti LiDAR dimana kursus berkaitan dengan LiDAR diadakan bagi individu ataupun kumpulan yang berminat. Agensi kerajaan yang lain seperti Jabatan Mineral dan Galian (JMG) dan Jabatan Pengairan dan Saliran (JPS) juga tidak ketinggalan dalam aktiviti LiDAR, dimana pegawai JUPEM turut serta dalam memberi khidmat nasihat pemetaan. Jabatan Audit Negara pula merupakan entiti yang menjalankan semak dan imbang pelaksanaan aktiviti ini dengan dibantu dengan JUPEM sebagai pengaudit data LiDAR yang telah dilaksanakan. Rangkuman kronologi perkembangan teknologi LiDAR di peringkat JUPEM boleh dilihat pada Rajah 4.

2002 Perolehan OPTECH ALTM 30/70 (ALS) 2004 Perolehan CYRAX 2500 (TLS)		2013 Perolehan Data Lidar (SH15/2013) 2014 SmartKadaster Fasa I (T19/ 2014)		2020 Malaysia lockdown.
2000	2005	2010	2015	2020
	<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p>SME bagi agensi luar</p> <ul style="list-style-type: none"> 2013 Perkhidmatan LiDAR (MaCGDI) 2015 Perolehan Faro Focus 3D (INSTUN) 2016 Audit Data (Jab Audit Negara) 2017 Perolehan Faro Focus M series (INSTUN) 2015-2019 Perkhidmatan LiDAR (JMG) 2016-2019 Perkhidmatan LiDAR (JPS) </div>		<ul style="list-style-type: none"> 2016 Pekhidmatan LiDAR Kelantan (T14/2016, T15/2016 dan T16/2016) 2016 Pekhidmatan LiDAR Terengganu (T17/2016, T18/2016) 2018 Pekhidmatan LiDAR Terengganu (SH2/2018, SH3/2018) 2018 Pekhidmatan LiDAR Kelantan (SH4/2018) 2016 Pekhidmatan LiDAR ???(T1?_2016) 2019 SmartKadaster Fasa II (T14_2019) 2019 Pekhidmatan LiDAR Kota Belud (T15_2019) 	

Rajah 4: Kronologi perkembangan teknologi LiDAR peringkat JUPEM

3. Proses kerja

Penawanan data LiDAR sangat menitikberatkan dari segi peralatan bagi memastikan data yang diperolehi tidak mengalami sebarang masalah untuk dikeluarkan. Isu ini sangat penting kerana kesemua peralatan dan perisian yang

melibatkan pemrosesan data LiDAR memerlukan kos yang sangat tinggi (Lohani & Ghosh, 2017). Terdapat beberapa fasa perlu dijalankan sebelum penghasilan hasil akhir digunakan bagi pelbagai tujuan. Antara fasa yang terlibat adalah seperti fasa penawanan data di lapangan dan fasa pemrosesan produk output.

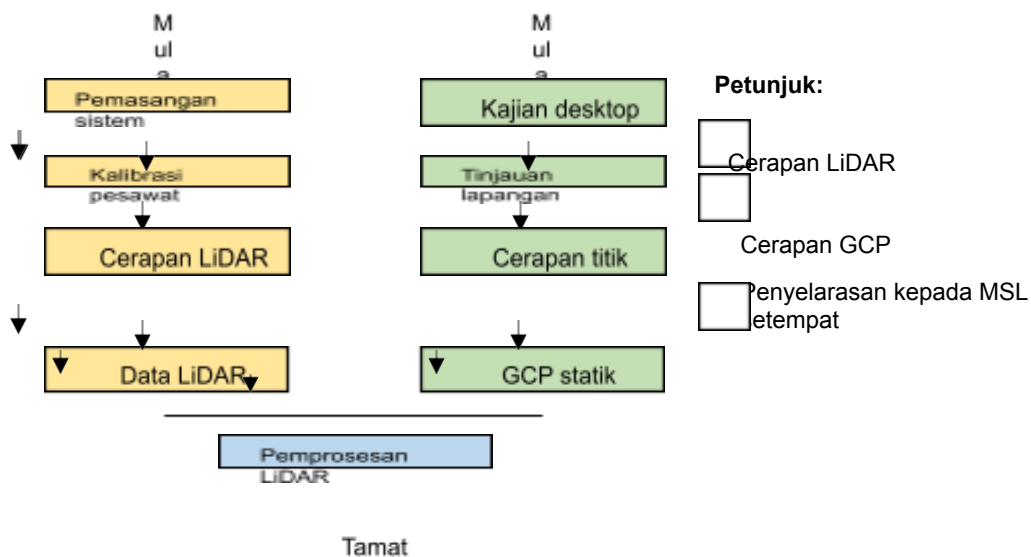
3.1. Fasa penawanan data di lapangan

Bagi penawanan data LiDAR, tinjauan kawasan kerja perlulah dilakukan terlebih dahulu. Hal ini adalah penting untuk mengkaji dan menyediakan jaringan kawalan GNSS yang baik bagi memastikan ketepatan data yang diterima adalah memenuhi spesifikasi yang dikehendaki. Setelah jaringan kawalan GNSS telah dirangka, pengukuran statik bagi GPS *base station* atau titik kawalan bumi (GCP) boleh dilakukan. Bilangan titik kawal yang banyak adalah lebih baik untuk penghasilan data LiDAR yang berkualiti terutama dari nilai ketinggian (Escobar Villanueva et al., 2019).

Bagi perolehan data LiDAR udara, prosedur yang betul perlu dipraktikkan dimana langkah pertama yang perlu dilakukan adalah dengan pemasangan sistem dan komponen di pesawat diikuti dengan kalibrasi penerbangan. Kalibrasi penerbangan perlu dilakukan bagi memastikan pemasangan sistem tidak mengalami sebarang komplikasi ketika penerbangan sebenar dilakukan (Berger et al., 2019). Setelah itu proses kutipan data di lapangan bagi penerbangan sebenar boleh dilakukan.

Bagi tujuan semakan, GCP perlu dibuat dengan melihat kepada kawasan atau *Area of Interest* (AOI) yang bersesuaian. GCP mestilah merangkumi keseluruhan

kawasan kerja (Escobar Villanueva et al., 2019) dengan jaringan GNSS yang sesuai. Setiap GCP akan diceraap selama 4 hingga 8 jam bagi mendapatkan hasil data yang baik dan stabil. Nilai kordinat (x, y, z) daripada GCP akan dibandingkan dengan nilai yang diperoleh daripada LiDAR. Bagi penyediaan GCP, Jurukur yang melakukan penyediaan ini haruslah berdaftar dengan Lembaga Jurukur Tanah (LJT), walau bagaimanapun bagi Jurukur yang tidak berdaftar, penyediaan GCP ini masih boleh dilakukan tetapi perlu melalui pihak yang berdaftar bagi memastikan kawalan GCP yang dilakukan adalah betul. Pemilihan alat pengesan yang bersesuaian turut menjadi aspek yang penting sebelum misi dilancarkan. Hal ini kerana, setiap alat mempunyai keupayaan yang berbeza dan ia mempengaruhi hasil akhir ketumpatan titik LiDAR. Aliran prosedur kerja cerapan data LiDAR adalah seperti di Rajah 5.



Rajah 5: Prosedur kerja LiDAR

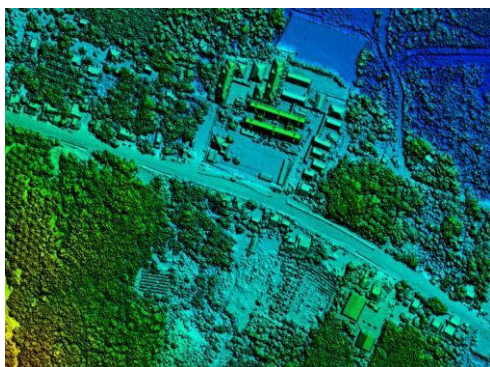
3.2. Fasa pemprosesan produk output

Apabila kutipan data dilapangan telah dilakukan, fasa pemprosesan data LiDAR akan dilaksanakan. Beberapa semakan penting perlu dijalankan antaranya

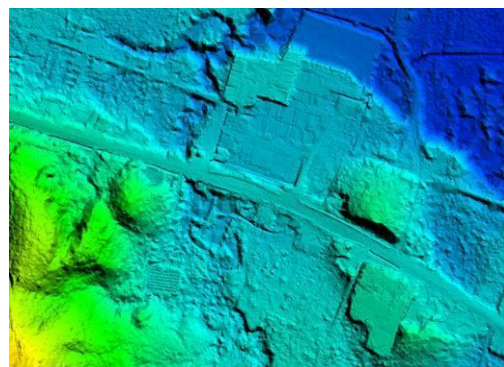
perkakasan yang berspesifikasi tinggi, keupayaan perisian, dan sebagainya (Lohani & Ghosh, 2017). Komputer yang berkeupayaan tinggi diperlukan kerana saiz data yang amat besar dihasilkan terutama bagi kawasan yang agak besar. Kebiasaannya, data yang diterima daripada sensor adalah daripada format .BIL dimana format ini akan ditukarkan kepada format LAS. Kemudian pengelasan data akan dilakukan mengikut *classification number* yang telah ditetapkan oleh *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ISPRS). Antara perisian yang kerap digunakan adalah perisian TerraSolid. Perisian ini menggunakan algoritma *Adaptive Triangulated Irregular Network* (ATIN) bagi memproses penurasan titik LiDAR bumi (Axelsson, 2000; Badenko et al., 2019). Terdapat juga perisian lain (LiDAR360, ALDPAT) yang menggunakan algoritma ini disebabkan hasil yang diterbitkan amat berkualiti tinggi.

Selain itu, perkembangan arus teknologi dilihat memberi impak positif terhadap pengelasan titik LiDAR dimana penggunaan teknologi *Artificial Intelligence* (AI) dilihat amat membantu dalam proses pengelasan titik LiDAR. Prinsip seperti *Random Forest*, *Artificial Neural Network*, dan *Support Vector machine* yang diimplimentasi didalam perisian bagi pemrosesan data LiDAR membantu dalam memberikan hasil akhir dengan cepat dan berkualiti tinggi (Raczko & Zagajewski, 2017). Selain pengelasan titik bumi yang berkualiti tinggi, pengelasan objek buatan manusia seperti bangunan, tiang lampu, pokok turut dikelaskan dengan terperinci. Berasaskan pengelasan yang dilakukan, produk seperti model digital permukaan (DSM) dan model digital bumi (DTM) akan dapat dihasilkan (Saraf et al., 2020). Setiap produk yang dikeluarkan haruslah dilakukan semakan kualiti bagi memastikan tiada ralat seperti *spike*, *void area* dan lain-lain lagi (Saylam et

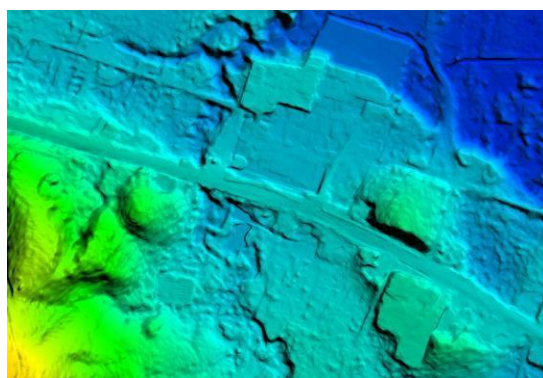
al., 2018). Setelah semakan terperinci dilakukan, pembetulan kepada data harus dilaksanakan. Ini kerana penghasilan kontur yang baik adalah sangat bergantung pada kualiti data DTM yang dihasilkan. Kesenambungan daripada data DTM, pengekstrakan fitur seperti fitur badan air, jalan dan sebagainya dapat dilakukan bagi mengikut keperluan sesuatu agensi. Setiap data yang dihasilkan perlu melalui proses semakan kualiti terhadap fitur bagi memastikan dapatan yang diperolehi adalah tepat dan menghampiri sebaik mungkin permukaan bentuk muka bumi di lapangan (Saraf et al., 2020). Rajah 6 menunjukkan beberapa ilustrasi hasil akhir yang dihasilkan daripada data LiDAR.



(a)



(b)



(c)

Rajah 6: Penjanaan model digital (a) DSM, (b) DEM, dan (c) DTM

4. Kesimpulan

Keupayaan teknologi LiDAR dalam mengenalpasti struktur bentuk muka bumi telah diuji dan terbukti melalui pelbagai aplikasi di seluruh dunia. Pengaplikasian kaedah ini untuk tujuan pemetaan topografi adalah tepat dan amat bersesuaian bagi menggambarkan maklumat ketinggian, cerun menerusi produk DSM dan DTM yang berkejituan tinggi. Produk-produk yang diperolehi boleh dimanfaatkan dalam pelbagai kegunaan sama ada dalam pengurusan bencana mahupun pembangunan negara . Oleh itu, perkembangan teknologi LiDAR haruslah sentiasa diteliti dari masa ke masa dan memanfaatkan sepenuhnya keupayaan yang ditawarkan dalam penambahbaikan proses kerja khususnya untuk bidang ukur dan pemetaan.

Rujukan

- Asvadi, A., Girão, P., Peixoto, P. & Nunes, U. 2016. 3D object tracking using RGB and LIDAR data. *In. 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 1255-1260
- Axelsson, P., 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive tin models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII, 85-92.
- Badenko, V., Zotov, D., Muromtseva, N., Volkova, Y. & Chernov, P. 2019. Comparison of software for airborne laser scanning data processing in smart city applications. *Int. Arch. Photogram., Remote Sens. Spat. Inform. Sci.*

- Berger, A., Andrews, R., McMichael, R., Nikitin, D., Pesch, B. A. & Pilnick, B. 2019. *U.S. Patent No. 10,359,507. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.*
- Bradley, T. 2019. Nat Geo uses technology to reveal 3D survey of epic Thai Cave Rescue. *Forbes Site.* Retrieved from <https://www.forbes.com/sites/tonybradley/2019/07/23/nat-geo-uses-technology-to-reveal-3d-survey-of-epic-thai-cave-rescue/#eb58ff75120e>
- Degnan, J., J. 2002. A conceptual design for a spaceborne 3D imaging lidar. *e&i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 119(4), 99-106.
- Diaz J., C., F., Carter W., E., Shrestha R., L. & Glennie C., L. 2017 LiDAR Remote Sensing. *Handbook of Satellite Applications*. Springer, Cham
- Einstein, A. 1917. Zur quantentheorie der strahlung. *Physikalische Zeitschrift*. 18: 121–128.
- Escobar Villanueva, J., R., Iglesias Martínez, L. & Pérez Montiel, J., I. 2019. DEM generation from fixed-wing UAV imaging and LiDAR-derived ground control points for flood estimations. *Sensors*, 19(14), 3205
- Gao, Y., Liu, S., Atia, M., M. & Noureldin, A. 2015. INS/GPS/LiDAR integrated navigation system for urban and indoor environments using hybrid scan matching algorithm. *Sensors*, 15(9), 23286-23302.
- Gatziolis, D. & Andersen, H., E. 2008. A guide to LIDAR data acquisition and processing for the forests of the Pacific Northwest. *Gen. Tech. Rep. PNW-GTR- 768*. Portland, OR: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 32, 768
- GIM International. 2018. The behind-the-scenes story of the Thailand cave rescue. *GIM International Article.* Retrieved from <https://www.gim->

international.com/content/article/the-behind-the-scenes-story-of-the-thailand-cave-rescue

- Isa, M., B., Hua, T. C. & Halim, N., B., A. 2015. SmartKADASTER: Observing beyond traditional cadastre capabilities for Malaysia. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 53.
- Lippi, G., L., Mørk, J. & Puccioni, G., P. 2019. Analytical vs. numerical Langevin description of noise in small lasers. *arXiv preprint arXiv:1903.08859*.
- Lohani, B. & Ghosh, S. 2017. Airborne LiDAR technology: a review of data collection and processing systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, 87(4), 567-579.
- Market Watch. 2020. Lidar Mapping Market Growth Rate by Share 2020-2026 | Revenue Forecast by Product Type, Applications and Regions and COVID-19 impact on Global Industry. *Market Watch Press Release*. Retrieved from <https://www.marketwatch.com/press-release/lidar-mapping-market-growth-rate-by-share-2020-2026-revenue-forecast-by-product-type-applications-and-regions-and-covid-19-impact-on-global-industry-2020-06-01>
- McCarthy, D. 2017. The history of time. *In The Science of Time 2016*, 75-75. Springer, Cham.
- Mehendale, N. & Neoge, S. 2020. Review on LiDAR Technology. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3604309> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3604309>
- Paris, C., Kelbe, D., Van Aardt, J. & Bruzzone, L. 2017. A novel automatic method for the fusion of ALS and TLS lidar data for robust assessment of tree crown structure. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(7), 3679-3693.

- Purkis, S., J. 2018. Remote sensing tropical coral reefs: the view from above. *Annual review of marine science*, 10, 149-168.
- Raczko, E. & Zagajewski, B. 2017. Comparison of support vector machine, random forest and neural network classifiers for tree species classification on airborne hyperspectral APEX images. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), 144- 154.
- Ren, Y., Chai, L., Guo, J., Ren, Y., Liu, J., Shen, X. & Xing, L. 2020. Application of airborne LiDAR technology in transmission line survey. *In Journal of Physics: Conference Series*, 1550 (5), 052002. IOP Publishing.
- Saraf, N., M., Kamarolzaman, K., N., Saad, N., M., Khalid, N., Rasam, A., R., A. & Othman, A., N. 2020. Data verification of LiDAR-derived DEM from different interpolation techniques. *In Charting the Sustainable Future of ASEAN in Science and Technology*, 361-375. Springer, Singapore.
- Saylam, K., Hupp, J., R., Averett, A., R., Gutelius, W., F. & Gelhar, B., W. 2018. Airborne LiDAR bathymetry: assessing quality assurance and quality control methods with Leica Chiroptera examples. *International Journal of Remote Sensing*, 39(8), 2518-2542.
- Shih, K., T., Balachandran, A., Nagarajan, K., Holland, B., Slatton, K., C. & George, A. D. 2008. Fast real-time LIDAR processing on FPGAs. *In ERSA*, 231-237.
- Telling, J., Lyda, A., Hartzell, P. & Glennie, C. 2017. Review of earth science research using terrestrial laser scanning. *Earth-Science Reviews*, 169, 35-68.
- Toschi, I., Allocca, M. & Remondino, F. 2018. Geomatics mapping of natural hazards: overview and experiences. *Int Archives Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci*, 42(3/W4), 505-512.

- Wang, R., Peethambaran, J. & Chen, D. 2018. LiDAR point clouds to 3-D Urban Models: A review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(2), 606-627.
- Weimer, C., Lieber, M., Rohrschneider, R. & Ruppert, L. 2017. A spaceborne adaptive lidar for earth imaging. *In 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 4224-4227
- Yang, J., Zhao, B. & Liu, B. 2019. Distance and velocity measurement of coherent lidar based on chirp pulse compression. *Sensors*, 19(10), 2313
- Young, J. 2011. LiDAR for Dummies: Hoboken, NJ: *Wiley Publishing*, Inc.