



Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <http://jmes.humg.edu.vn>



Developing a procedure to produce large-scale topographic maps of open-pit mines using rotary wing unmanned aerial vehicles



Long Quoc Nguyen ^{1,*}, Tam Thanh Thi Le ¹, Canh Van Le ¹, Cuong Xuan Cao ¹, Minh Tuyet Dang ², Dung Ba Nguyen ³

¹ Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

² Thuyloi University, Hanoi, Vietnam

³ Hanoi University of Natural Resources and Environment, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16th Mar. 2022

Revised 30th June 2022

Accepted 31st July 2022

Keywords:

Dong Da Mai coal mine,
Large-scale topographic maps,
Long son quarry,
Open-pit mines,
Rotary wing UAV.

ABSTRACT

Recently, the rapid development of unmanned aerial vehicle (UAV) has led to increasingly popular applications of this technology in the field of surveying and mapping. This article presents the result of developing a procedure to produce large-scale topographic maps for open-pit mines in Vietnam in which unmanned aerial vehicles (UAV) are used to collect data. With the goal of creating a procedure that ensures accuracy, safety, and efficiency for the production of topographic maps, the theories and official regulations for measuring and editing topographic maps in general and in mines in particular, as well as using drones in Vietnam have been applied. The procedure is specifically developed for the vertical takeoff and landing (rotary) UAVs. Experiments consisting of the flight altitude calculation, determining the appropriate take-off position, and image acquisition were conducted at two open-pit mines, namely Dong Da Mai coal mine and Long Son quarry to verify the procedure. The digital surface models (DSM) and orthophotos are generated from the acquired photos, georeferenced to the VN-2000 coordinate system using ground control points (GCP), and evaluated with checkpoints. In addition, the experiment included the investigation of the various combination of GCP networks to determine the optimal GCP number for each case. Experimental results show that the procedure is logical, correct, straightforward, safe, and effective. UAV resulted products, such as orthophotos, DSM, and topographic maps were accurate and met the requirements of all the national standards.

Copyright © 2022 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: nguyenquoclong@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2022.63(5).02



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn>



Xây dựng quy trình thành lập bản đồ địa hình tỷ lệ lớn mỏ lộ thiên bằng thiết bị bay không người lái cất cánh thẳng đứng

Nguyễn Quốc Long ^{1,*}, Lê Thị Thanh Tâm ¹, Lê Văn Cảnh ¹, Cao Xuân Cường ¹,
Đặng Tuyết Minh ², Nguyễn Bá Dũng ³

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

² Trường Đại học Thủy Lợi, Hà Nội, Việt Nam

³ Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

TÓM TẮT

Quá trình:

Nhận bài 16/3/2022

Sửa xong 30/6/2022

Chấp nhận đăng 31/7/2022

Từ khóa:

Bản đồ địa hình tỷ lệ lớn,

Mỏ đá Long Sơn,

Mỏ lộ thiên,

Mỏ than Đông Đá Mài,

UAV cất cánh quạt.

Gần đây, những phát triển vượt bậc của công nghệ máy bay không người lái (UAV) đã cho phép nhiều ứng dụng ngày càng phổ biến của công nghệ này trong lĩnh vực trắc địa bản đồ. Bài báo giới thiệu kết quả xây dựng quy trình kỹ thuật thành lập bản đồ địa hình tỷ lệ lớn cho các mỏ lộ thiên ở Việt Nam bằng thiết bị UAV cất cánh thẳng đứng. Mục tiêu trong nghiên cứu này là đưa ra một quy trình kỹ thuật đảm bảo chính xác, an toàn và hiệu quả; các cơ sở khoa học và cơ sở pháp lý về đo vẽ thành lập bản đồ địa hình nói chung và địa hình mỏ lộ thiên nói riêng và về sử dụng UAV của Việt Nam đã được nghiên cứu áp dụng. Để kiểm chứng quy trình, công tác thực nghiệm được tổ chức tại hai mỏ lộ thiên là mỏ than Đông Đá Mài và mỏ đá Long Sơn. Các nội dung thực nghiệm quy trình bao gồm tính toán độ cao bay chụp và xác định vị trí cất cánh phù hợp. Mô hình số bề mặt (DSM) và ảnh trực giao được thành lập từ ảnh bay chụp, nối về hệ tọa độ VN-2000 sử dụng các điểm khống chế ảnh (KCA) và được đánh giá độ chính xác với các điểm kiểm tra. Ngoài ra, thực nghiệm cũng khảo sát số lượng KCA để xác định số điểm tối ưu. Kết quả thực nghiệm cho thấy quy trình ứng dụng UAV cất cánh quạt, cất hạ cánh thẳng đứng trong thành lập bản đồ địa hình tỷ lệ lớn mỏ lộ thiên đảm bảo chặt chẽ, chính xác, dễ thực hiện, an toàn và hiệu quả. Các sản phẩm như ảnh trực giao, mô hình DSM và bản đồ địa hình chính xác và đáp ứng được các yêu cầu của quy định hiện hành.

© 2022 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

*Tác giả liên hệ

E - mail: nguyenquoclong@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2022.63(5).02

1. Mở đầu

Trong lĩnh vực khai thác mỏ lộ thiên, vai trò quan trọng của bản đồ địa hình đã được nhắc đến trong nhiều nghiên cứu (Nguyen và nnk., 2020a; Bui và nnk., 2017; Võ và Nguyễn, 2014) và thực tế sản xuất (Bộ Công Thương, 2015). Bản đồ địa hình mỏ lộ thiên là tài liệu quan trọng phục vụ các hoạt động quản lý và điều khiển sản xuất ở mỏ (Nguyễn và Cao, 2019). Các phương pháp đo vẽ truyền thống đã và đang được sử dụng bao gồm phương pháp toàn đạc định vị vệ tinh (GNSS) tương đối động xử lý tức thời (GNSS/RTK). Đây là những phương pháp đã được xây dựng quy trình đầy đủ (Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2015) và được sử dụng phổ biến tại các mỏ lộ thiên của Việt Nam (Võ và Nguyễn, 2014; Võ và nnk., 2010). Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng, mặc dù đây là các phương pháp đo đạc trực tiếp có độ chính xác cao, nhưng tốn nhiều sức lao động và thời gian, trong một số trường hợp, độ an toàn lao động không cao, do đó tính hiệu quả còn thấp (Le và nnk., 2020b). Gần đây, các công nghệ mới như công nghệ quét laser 3D mặt đất (TLS), công nghệ Lidar hàng không, công nghệ UAV đã và đang được phát triển và ứng dụng trong lĩnh vực trắc địa bản đồ, tạo ra tiềm năng thay thế các công nghệ truyền thống.

Thập niên vừa qua chứng kiến sự phát triển vượt bậc của thiết bị bay không người lái và các máy ảnh số. Điều này đã tạo điều kiện thuận lợi cho việc ứng dụng rộng rãi thiết bị này trong nhiều lĩnh vực khác nhau của đời sống xã hội (Cryderman và nnk., 2014; Đỗ, 2019; Taddia và nnk., 2020). Trong lĩnh vực trắc địa - bản đồ, việc xây dựng quy trình bay chụp thành lập bản đồ địa hình đã được nghiên cứu thực hiện ở nhiều quốc gia trên thế giới. Ở Mỹ, các điều kiện an toàn bay chụp, các quy định được thể hiện trong Luật UAV do Tổ chức quản lý hàng không liên bang Mỹ đưa ra, trong khi các yêu cầu về đo vẽ bản đồ địa hình được quy định trong (ASPRS, 2015). Ở Trung Quốc, các quy định được ghi chi tiết tại (China, 2008). Các ví dụ nêu trên cho thấy tầm quan trọng của việc thiết lập quy trình, quy định về sử dụng UAV thành lập bản đồ địa hình. Các dẫn chứng cũng chỉ ra rằng, quy trình xây dựng bản đồ địa hình bằng UAV sẽ đảm bảo tính thống nhất, chuyên nghiệp, hiệu quả, chính xác và an toàn trong quá trình thực hiện các dự án. Ở Việt Nam hiện nay, với giá thành ngày càng thấp, công nghệ

bay chụp UAV bắt đầu được sử dụng rộng rãi trong thành lập bản đồ địa hình (Bui và nnk., 2017). Các quy định mới nhất về ứng dụng công nghệ UAV trong thành lập bản đồ địa hình được công bố tại Thông tư số 07/2021/TT-BTNMT ngày 30/6/2021 của Bộ Tài nguyên và Môi trường (Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2021).

Việc ứng dụng công nghệ UAV trong thành lập bản đồ địa hình mỏ lộ thiên đã được thực hiện (Lee và Choi, 2016; Nguyen và nnk., 2020b; 2021c; Nguyen, 2021b; Bui và nnk., 2017; Xiang và nnk., 2018). Các nghiên cứu đã khẳng định công nghệ UAV đảm bảo độ chính xác của bản đồ địa hình tỷ lệ lớn (Nguyễn, 2021a). Bên cạnh đó, các nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, UAV cánh quạt cất cánh thẳng đứng là thiết bị tối ưu trong thành lập bản đồ địa hình ở mỏ lộ thiên (Lee và Choi, 2015; Nguyễn, 2021a). Đây là loại UAV có kích thước nhỏ gọn, giá thành thấp, hoạt động hiệu quả và an toàn trong không gian hẹp. Điều này đặc biệt phù hợp với mỏ lộ thiên, một dạng địa hình tương đối phức tạp, đặc trưng với hào sâu, tầng bậc có độ dốc và chiều cao thay đổi lớn. Bên cạnh đó, hoạt động khai thác mỏ thường diễn ra liên tục, tạo ra tốc độ thay đổi địa hình nhanh. Do đó, hoạt động đo vẽ bản đồ địa hình cập nhật hiện trạng, tính toán khối lượng được yêu cầu thực hiện với tần suất cao. Việc sử dụng UAV cánh quạt cất cánh thẳng đứng trong điều kiện không gian hẹp, phức tạp, với nhiều phương tiện cùng hoạt động của các mỏ lộ thiên cần được thực hiện theo một quy trình nghiêm ngặt, nhằm đảm bảo an toàn, hiệu quả và chính xác. Tuy nhiên, hiện nay, chưa có một quy trình cụ thể nào cho hoạt động này ở các mỏ lộ thiên. Bài viết nghiên cứu đề xuất quy trình thành lập bản đồ địa hình mỏ lộ thiên tỷ lệ lớn 1:500; 1:1000; và 1:2000 bằng công nghệ UAV cánh quạt cất cánh thẳng đứng. Trong nghiên cứu này, các nội dung như cơ sở khoa học xây dựng quy trình, bay chụp thực nghiệm, đánh giá độ chính xác, tính hiệu quả và mức độ an toàn của các bước trong quy trình sẽ được giới thiệu như sau.

2. Căn cứ pháp lý và cơ sở khoa học thành lập quy trình

2.1. Căn cứ pháp lý

Các căn cứ pháp lý được sử dụng để xây dựng quy trình bao gồm các thông tư, quyết định và tiêu chuẩn chất lượng liên quan tới lĩnh vực trắc địa

bản đồ, được các cơ quan có thẩm quyền ban hành. Trong lĩnh vực trắc địa bản đồ, Thông tư số 68/2015/TT-BTNMT ngày 22/12/2015 của Bộ Tài nguyên và Môi trường (Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2015) và Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 10673:2015 Trắc địa mỏ, do Bộ Công Thương ban hành (Bộ Công Thương, 2015) là hai tài liệu quan trọng cung cấp các cơ sở cho công tác đo đạc thành lập bản đồ địa hình. Lĩnh vực bay chụp UAV thành lập bản đồ địa hình tỷ lệ lớn chịu sự điều chỉnh của Thông tư số 07/2021/TT-BTNMT của Bộ Tài nguyên và Môi trường. Bên cạnh đó, việc đảm bảo an toàn và an ninh khi sử dụng thiết bị bay UAV cần tuân thủ các quy định được nêu rõ trong Nghị định số 36/2008/NĐ-CP ngày 28/3/2008 và mới nhất là Nghị định số 79/2011/NĐ-CP ngày 05/9/2011 của Chính phủ.

2.1.1. Yêu cầu kỹ thuật của bản đồ địa hình ở mỏ lộ thiên

Về cơ bản, bản đồ địa hình ở mỏ lộ thiên cũng giống như các bản đồ địa hình thông thường, tuân theo các quy định kỹ thuật chung tại Thông tư số 68/2015/TT-BTNMT của Bộ Tài nguyên và Môi trường (Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2015). Do tính chất đặc thù của mỏ lộ thiên, các yêu cầu thành lập bản đồ địa hình mỏ lộ thiên được quy định trong Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 10673:2015 Trắc địa mỏ, do Bộ Công Thương ban hành (Bộ Công Thương, 2015). Các yêu cầu về độ chính xác được quy định cụ thể như sau:

- Sai số trung phương vị trí điểm của mép tầng theo hướng vuông góc với gương tầng tính theo mốc lưới đo vẽ gần nhất không được vượt quá ± 0.5 mm trên bản đồ;

- Sai số trung phương xác định độ cao các điểm mia tính theo độ cao mốc lưới đo vẽ gần nhất không được vượt quá $\pm 0,2$ m.

Có thể thấy rằng, quy phạm trắc địa mỏ quy định độ chính xác mặt bằng của bản đồ địa hình mỏ lộ thiên thấp hơn so với quy phạm bản đồ địa hình (Thông tư số 68/2015/TT-BTNMT của Bộ Tài nguyên và Môi trường). Theo Thông tư số 68/2015/TT-BTNMT, độ chính xác mặt bằng không vượt quá 0,3 mm theo tỷ lệ bản đồ với địa vật rõ nét và $\pm 0,5$ mm theo tỷ lệ bản đồ với địa vật không rõ nét. Về độ cao, độ chính xác không vượt quá $\pm 0,2$ m, như vậy độ chính xác trong quy phạm trắc địa mỏ tương đương với quy định tại Thông tư số 68/2015/TT-BTNMT cho bản đồ địa hình ở

khu vực có độ dốc từ 2÷6 độ. Với địa hình dốc từ 6 độ trở lên, độ chính xác độ cao không vượt quá 1/3 khoảng cao đều đường đồng mức ($0,5 \div 1$ m).

Tháng 6 năm 2021, Bộ Tài nguyên và Môi trường ban hành Thông tư số 07/2021/TT-BTNMT về Quy định kỹ thuật thu nhận và xử lý dữ liệu ảnh số từ tàu bay không người lái phục vụ xây dựng, cập nhật cơ sở dữ liệu nền địa lý quốc gia tỷ lệ 1:2.000, 1:5000 và thành lập bản đồ địa hình tỷ lệ 1:500, 1:1.000. Đây được xem là quy định mới nhất và đầu tiên tại Việt Nam về sử dụng công nghệ UAV thành lập bản đồ địa hình tỷ lệ lớn. Mặc dù có những quy định rất cụ thể về công tác thu thập dữ liệu, xử lý, đánh giá độ chính xác và đóng gói sản phẩm. Tuy nhiên, nếu áp dụng cho các mỏ lộ thiên thì cần phải nghiên cứu đánh giá, do đặc điểm của địa hình mỏ lộ thiên rất khác so với các địa hình thông thường.

2.1.2. Yêu cầu an toàn sử dụng UAV

UAV là thiết bị công nghệ hiện đại, nhưng đồng thời cũng là thiết bị có thể gây mất an toàn, an ninh trong một số điều kiện nhất định. Nhằm đảm bảo khai thác thiết bị an toàn, hiệu quả và tránh gây ảnh hưởng tới an ninh, an toàn hàng không, Nghị định số 36/2008/NĐ-CP ngày 28/3/2008 của Chính phủ và Nghị định số 79/2011/NĐ-CP sửa đổi bổ sung Nghị định số 36 đã nêu rõ các yêu cầu trong công tác xin phép, cấp phép, điều hành bay và tổ chức hoạt động bay. Ngoài ra cũng cần tuân thủ các quy định về vùng cấm bay và hạn chế bay theo Quyết định số 18/2020/QĐ-TTg ngày 10/6/2020 của Thủ tướng Chính phủ về Thiết lập khu vực cấm bay, khu vực hạn chế bay đối với tàu bay không người lái và các phương tiện bay siêu nhẹ, đặc biệt là các khu vực mỏ nằm gần các sân bay hoặc đường biên giới quốc gia.

2.2. Cơ sở khoa học thiết kế bay chụp

Thiết kế bay chụp là một nhiệm vụ quan trọng trong thành lập bản đồ địa hình bằng UAV. Nhiệm vụ này bao gồm tính chiều cao bay chụp, lựa chọn độ phủ trùm dọc và ngang của ảnh, vị trí điểm cất cánh. Đây là các yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác, mức độ an toàn và tính hiệu quả của công việc. Do đó, cần phải có các căn cứ khoa học để lựa chọn.

2.2.1. Tính chiều cao bay chụp

Bản đồ ở mỗi tỷ lệ đều có tiêu chuẩn về độ chính xác về vị trí điểm mặt bằng và độ cao cần đạt được khi thành lập. Sai số vị trí điểm trên bản đồ có thể được tính toán từ độ phân giải ảnh mặt đất (GSD). Do vậy, cần tính toán GSD phù hợp với tỷ lệ bản đồ cần thành lập, mẫu số tỷ lệ là M, GSD có thể được tính theo công thức (1) (Jacobsen, 2005):

$$GSD = (0,05 \div 1)M \tag{1}$$

Sai số vị trí điểm mặt bằng (m_p) và cao độ (m_h) điểm trên bản đồ thành lập từ ảnh bay chụp UAV được xác định theo GSD như sau (Trần Trung Anh và nnk., 2019):

$$m_p = (1 \div 2)GSD \tag{2}$$

$$m_h = (2 \div 3)GSD \tag{3}$$

Công thức (2) và (3) xác định sai số vị trí điểm yếu nhất trên bản đồ thành lập được. Các điểm khống chế ảnh mặt đất và điểm kiểm tra thường được dùng để đánh giá độ chính xác mô hình số bề mặt khi thành lập được. Các điểm này đóng vai trò như các điểm khống chế đo vẽ. Do vậy, sai số vị trí các điểm kiểm tra mô hình phải đạt đường chuyền cấp 1 (cao hơn so số cấp cuối cùng 1 cấp) tương ứng với sai số vị trí mặt bằng cần đạt $M_p = 0,1 M$ và vị trí độ cao $m_h \leq h/3$ (h - khoảng cao đều).

Chiều cao bay chụp của UAV cần được tính toán đến toàn bộ mô hình số bề mặt địa hình (DSM) đạt được độ phân giải nêu trên và được tính theo công thức (Bui và nnk., 2017):

$$H_{BC} = \frac{imW \cdot GSD \cdot FL}{SSw \cdot 100} \tag{4}$$

Trong đó: GSD - độ phân giải ảnh mặt đất (cm), FL - Chiều dài tiêu cự máy ảnh(mm), imW - độ rộng ảnh (pixel), SSw - độ rộng cảm biến (mm).

2.2.2. Lựa chọn vị trí cất cánh

Độ cao của vị trí cất cánh được tính theo công thức sau:

$$H_c = \frac{H_L - H_n}{2} \tag{5}$$

Trong đó: H_c - độ cao điểm cất cánh; H_L , H_n - độ cao lớn nhất và nhỏ nhất trên khu vực đo vẽ.

Dựa vào địa hình đo vẽ có thể ước tính được độ phân giải ảnh của điểm có độ cao nhỏ nhất trên mô hình theo công thức (6):

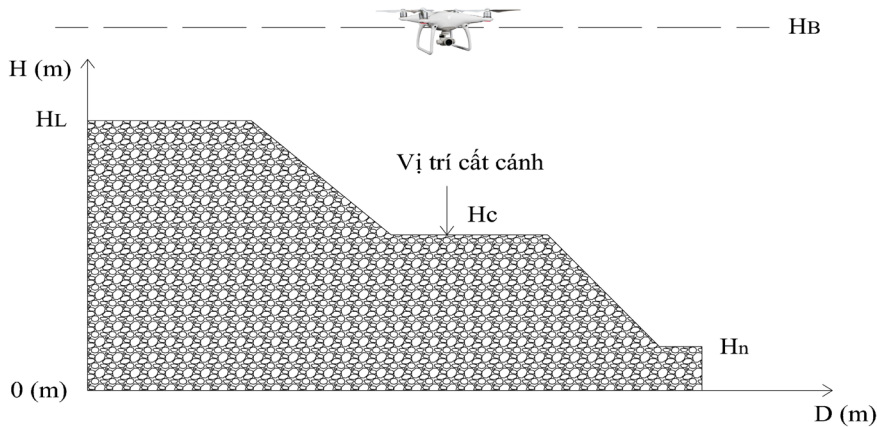
$$GSD_{Min} = \frac{H_c - H_n + H_B}{f} \mu \tag{6}$$

Trong đó: GSD_{Min} - độ phân giải của ảnh ở vị trí thấp nhất; H_B - chiều cao bay chụp được thiết kế; μ - kích thước của một điểm ảnh ở trên cảm biến thu nhận ảnh; f - chiều dài tiêu cự máy ảnh, μ và f được lấy trong thông số kỹ thuật máy ảnh. GSD_{min} phải nằm trong giới hạn nêu ở trên.

Chiều cao bay chụp, các thông số về độ cao điểm cất cánh, độ cao lớn nhất và nhỏ nhất trên khu vực đo vẽ được thể hiện như trên Hình 1.

2.3. Lựa chọn số lượng điểm khống chế ảnh

Số lượng điểm khống chế ảnh (KCA) ảnh hưởng rõ ràng tới độ chính xác vị trí mặt bằng và độ cao, khi số lượng KCA tăng sẽ dẫn tới độ chính xác tăng lên (Agüera-Vega và nnk., 2017; Martínez-Carricondo và nnk., 2018). Mật độ điểm khống chế ảnh được chọn theo tỷ lệ trên Bảng 1.



Hình 1. Đám mây điểm của UAV-LiDAR.

Bảng 1. Mật độ điểm khống chế ảnh (Martínez-Carricondo và nnk, 2018).

Tỷ lệ bản đồ	1:500	1:1000	1:2000
Mật độ điểm KCA (số điểm/ha)	≥ 2	1÷2	1÷2

Về phân bố điểm khống chế ảnh, căn cứ vào đặc điểm địa hình mỏ lộ thiên, các điểm KCA nên được bố trí đều trên khu vực đo vẽ. Các điểm KCA nên nằm ở vị trí gần ranh giới của khu vực đo vẽ, hoặc phân bố theo tầng bậc của mỏ lộ thiên đảm bảo cả hai yếu tố mặt bằng và độ cao.

2.4. Cơ sở khoa học xử lý ảnh bay chụp UAV

Phương pháp SfM (Structure from Motion) là thuật toán được sử dụng phổ biến nhất trong xử lý ảnh bay chụp UAV. Các phần mềm tích hợp thuật toán này có mức độ tự động hóa cao. Nếu quá trình xử lý dựa trên SfM thì bước đầu tiên là xác định đối tượng đặc trưng. Các thập kỷ trước, nhiều phương pháp xác định điểm đặc trưng được phát triển. Bên cạnh tính hiệu quả, các phương pháp có sự khác nhau rõ rệt trong mức độ phức tạp của thuật toán và đối tượng đặc trưng được xác định. Sau bước xác định điểm đặc trưng, các điểm này được biểu diễn dưới dạng vector. Các vector đặc trưng được tính dựa trên các tính chất riêng biệt của mỗi đối tượng được quyết định bởi các điểm ảnh xung quanh của đối tượng. Mỗi đối tượng được xác định là bất biến. Sau đó các điểm đặc trưng được khớp hay ghép với chính nó nhưng ở ảnh khác, chúng hình thành lên các điểm ảnh cùng tên. Để có thể khớp ảnh dựa vào các điểm ảnh cùng tên, khoảng cách giữa chúng được tính là khoảng cách Euclidean.

Sau khi có được một bộ dữ liệu các cặp điểm ảnh cùng tên hay điểm khóa "tie-point", cùng với các tham số định hướng tương đối, đây sẽ là dữ liệu đầu vào cho các bước cuối cùng của SfM. Tiếp theo, SfM sẽ tính tọa độ 3D của các điểm đặc trưng này trong hệ tọa độ thực, tạo ra một đám mây điểm với mật độ thưa (sparse 3D point cloud) và thể hiện cấu trúc hình học của khu vực. Bản chất của phép tính là vị trí 3D mỗi một điểm đặc trưng được tính từ một cặp điểm ảnh cùng tên của điểm đặc trưng đó, mỗi điểm ảnh nằm trên một ảnh.

Như vậy chúng hình thành một tam giác không gian ảnh (Image triangulation). Trên thực tế, có rất nhiều ảnh phủ trùm lên nhau, do đó có rất nhiều cặp điểm ảnh cùng tên của cùng một điểm đặc trưng, tức là có rất nhiều các tam giác ảnh không gian được hình thành. Tuy nhiên, tam giác ảnh không gian cần biết các tham số định hướng trong và định hướng ngoài của ảnh.

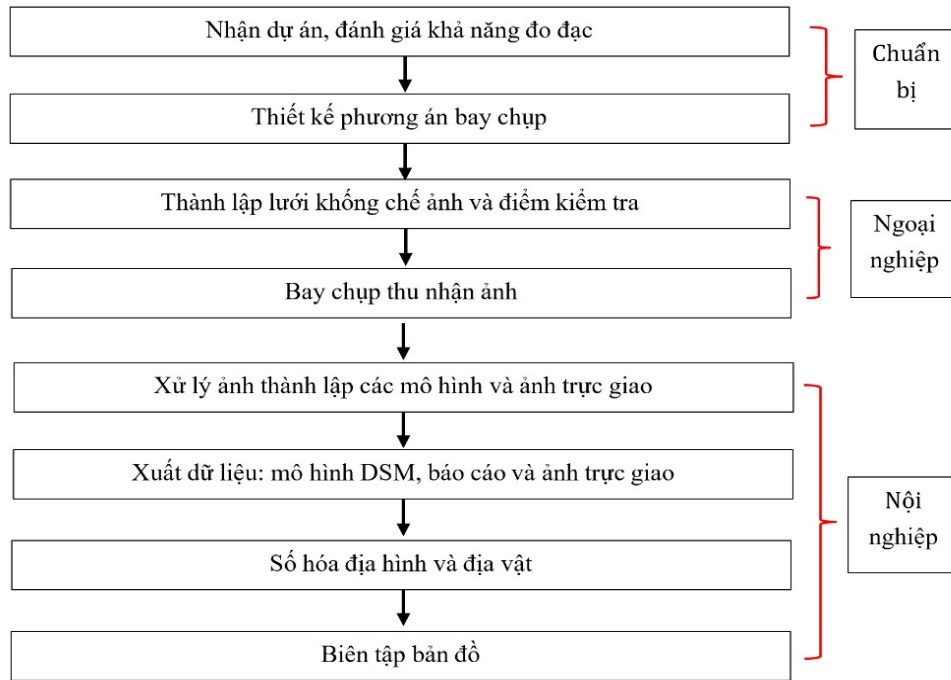
3. Quy trình thành lập bản đồ địa hình tỷ lệ lớn mỏ lộ thiên bằng UAV

Quy trình chung thành lập bản đồ địa hình mỏ lộ thiên bằng UAV bao gồm 3 giai đoạn chính: chuẩn bị, ngoại nghiệp và xử lý nội nghiệp (Hình 2). Trong công đoạn chuẩn bị cần khảo sát được đặc điểm địa hình khu vực, thiết kế được phương án bay chụp ảnh bao gồm: kế hoạch bay, chiều cao bay chụp, vị trí cất cánh của máy bay, số lượng và vị trí các điểm khống chế ảnh cần thiết, thiết bị cần sử dụng và phương án triển khai. Phần ngoại nghiệp bay chụp ảnh được thực hiện theo kế hoạch đã được thiết kế, điều chỉnh phương án nếu cần thiết để phù hợp với thực tế của địa hình và an toàn cho thiết bị sử dụng. Phần nội nghiệp được thực hiện trong phòng từ đánh giá chất lượng ảnh, ghép ảnh bằng thuật toán SfM, bình sai khối ảnh, tạo ảnh trực giao, DSM và cuối cùng là biên vẽ bản đồ.

4. Thực nghiệm đánh giá quy trình

4.1. Khu vực thực nghiệm

Để quy trình được đánh giá toàn diện, thực nghiệm được tiến hành tại 2 mỏ với các đặc trưng riêng. Thứ nhất, với địa hình mỏ khai thác than, moong khai thác xuống sâu so với địa hình xung quanh, đặc trưng cho các mỏ khai thác than tại Quảng Ninh, được lựa chọn tại mỏ than Đông Đá Mài, thuộc Tổng công ty Đông Bắc, Bộ Quốc phòng, trên địa bàn thành phố Cẩm Phả, tỉnh Quảng Ninh (Hình 3); thứ hai đặc trưng cho các mỏ khai thác lộ thiên với địa hình đồi núi cao, moong khai thác cao hơn địa hình xung quanh, đặc trưng là các mỏ khai thác đá vôi và đá vật liệu xây dựng. Khu vực thực nghiệm thứ hai này được chọn là mỏ đá vôi Long Sơn thuộc nhà máy xi măng Long Sơn, xã Hà Vinh, huyện Hà Trung, tỉnh Thanh Hóa (Hình 4).



Hình 2. Quy trình tổng quát thành lập bản đồ địa hình tỷ lệ lớn mở lộ thiên bằng UAV.



Hình 3. Mỏ than Đông Đá Mài, Quảng Ninh.

Đặc điểm địa hình của khu vực thực nghiệm tại mỏ Đông Đá Mài (Hình 3) và mỏ Long Sơn (Hình 4) cho thấy các khu vực thực nghiệm có điều kiện địa hình đặc trưng cho hai loại hình khai thác mỏ theo phương pháp lộ thiên phổ biến nhất tại Việt Nam, do vậy, phù hợp với yêu cầu đặt ra của nghiên cứu.

4.2. Thiết bị thực nghiệm

Máy bay Phantom4 Pro (P4) được sử dụng để thu thập ảnh khu vực nghiên cứu. Đây là dòng máy bay cánh quạt cất hạ cánh lên thẳng do hãng DJI sản xuất, đã và đang được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực trắc địa bản đồ. P4 được định vị tâm chụp



Hình 4. Mỏ đá Long Sơn, Thanh Hóa.

bằng hệ thống vệ tinh GPS/Glonass, được trang bị máy ảnh với độ phân giải 20Mb (DJI, 2017).

Các điểm khống chế ảnh và điểm kiểm tra được đo nổi tọa độ với điểm gốc bằng máy toàn đạc điện tử Topcon ES 105, với độ chính xác đo góc $\pm 5''$, độ chính xác đo chiều dài cạnh $2 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$ (Công ty cổ phần công nghệ Nguyễn Kim, 2020).

4.3. Thực nghiệm thành lập bản đồ địa hình tỷ lệ lớn mở lộ thiên bằng UAV

4.3.1. Thiết kế phương án bay chụp

Khu vực đo vẽ tại mỏ Đông Đá Mài và mỏ Long Sơn đều nằm trong ranh giới mỏ, xa khu vực quân sự, hành chính và sân bay, không nằm trong vùng giới hạn hoặc cấm UAV. Địa hình mỏ hầu như không có lớp phủ nên thuận lợi cho việc đo vẽ thực địa bằng công nghệ UAV.

Các thông số phục vụ thiết kế kế hoạch bay chụp ảnh UAV bao gồm: độ phủ trùm ảnh, chiều cao bay chụp và vị trí cất cánh cho UAV trên thực tế.

Địa hình cả hai khu vực nghiên cứu đều có chênh cao lớn ($>100 \text{ m}$) nhưng độ cao thay đổi thấp dần (Đông Đá Mài), tăng dần (Long Sơn), không có các vị trí đỉnh nhọn bất thường. Với

những đặc trưng địa hình này, độ phủ trùm ảnh được lựa chọn là 75%.

Xác định chiều cao bay chụp được thực hiện dựa vào các công thức số (4÷6). Trong đó, các thông số máy ảnh như sau: máy ảnh có độ phân giải 20Mb/pixel, FL = 2.4 mm, imW = 4864, SSw = 3.20 mm (DJI, 2020). Độ phân giải ảnh mặt đất tính toán được theo tỷ lệ bản đồ và thông số máy ảnh được ghi trong Bảng 2.

Bảng 2. Xác định chiều cao bay chụp.

Tỷ lệ bản đồ	1:500	1:1000	1:2000
Sai số vị trí mặt bằng (cm)	5	8,5	16,5
Sai số độ cao (cm)	12,5	25	50
GSD (cm)	2,5	5	10

Thay các giá trị GSD cho phép trên Bảng 2 và các thông số máy ảnh vào công thức (4) sẽ tính được chiều cao bay chụp cho phép như trên Bảng 3.

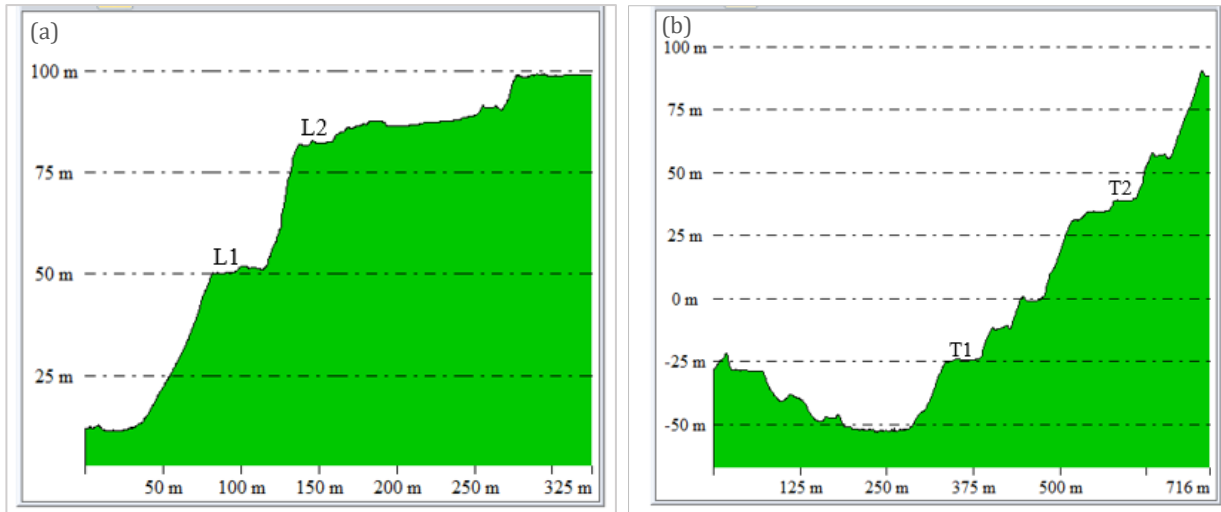
Bảng 3. Xác định chiều cao bay chụp cho phép

TT	Tỷ lệ	Chiều cao bay chụp tối đa cho phép (m)
1	1:500	93
2	1:1000	186
3	1:2000	373

Vị trí cất cánh của máy bay được xác định dựa vào chiều cao bay chụp cho phép và thực tế địa hình tại hai khu vực mỏ. Chênh cao địa hình lớn nhất tại mỏ Long Sơn là 110 m (Hình 5), trong khi thông số này tại mỏ than Đông Đá Mài là 140 m (Hình 6). Các chênh cao này đều nhỏ hơn nhiều so với chiều cao bay cho phép tại Bảng 3 đối với bản đồ tỷ lệ 1:1000 và 1:2000, nên đối với các tỷ lệ bản đồ này thì UAV có thể cất cánh ở bất kỳ vị trí nào trong khu vực, tuy nhiên, nên cất cánh ở vị trí có độ cao trung bình (Lê và nnk., 2020a). Với tỷ lệ bản đồ 1:500, để đảm bảo độ chính xác thì chiều cao bay chụp tối đa là 93 m (Bảng 3), do đó tại cả hai mỏ thì UAV đều không thể cất cánh tại vị trí trên bề mặt mỏ để bay chụp ảnh vì GSD sẽ không đạt

độ phân giải mong muốn do ảnh hưởng của chênh cao địa hình lớn.

Để bay chụp đúng độ phủ chùm đã thiết kế thì UAV phải bay cao hơn điểm cao nhất của địa hình cần bay chụp là 30 m (Lê và nnk., 2020a). Do vậy, đối với tỷ lệ 1:500 ở cả hai mỏ, UAV cần được bay chụp tại hai vị trí cất cánh để thỏa mãn điều kiện đạt được chiều cao bay chụp nhỏ hơn chiều cao giới hạn và cao hơn địa hình cao nhất 30 m. Tại mỏ Long Sơn, UAV được thiết kế cất cánh tại điểm L1 và L2 (Hình 5 a) , tại mỏ than Đông Đá Mài UAV, được thiết kế cất cánh tại điểm T1 và T2 (Hình 5 b). Các thông số về vị trí cất cánh của UAV được tính toán và thể hiện trên các Bảng 4 và 5.



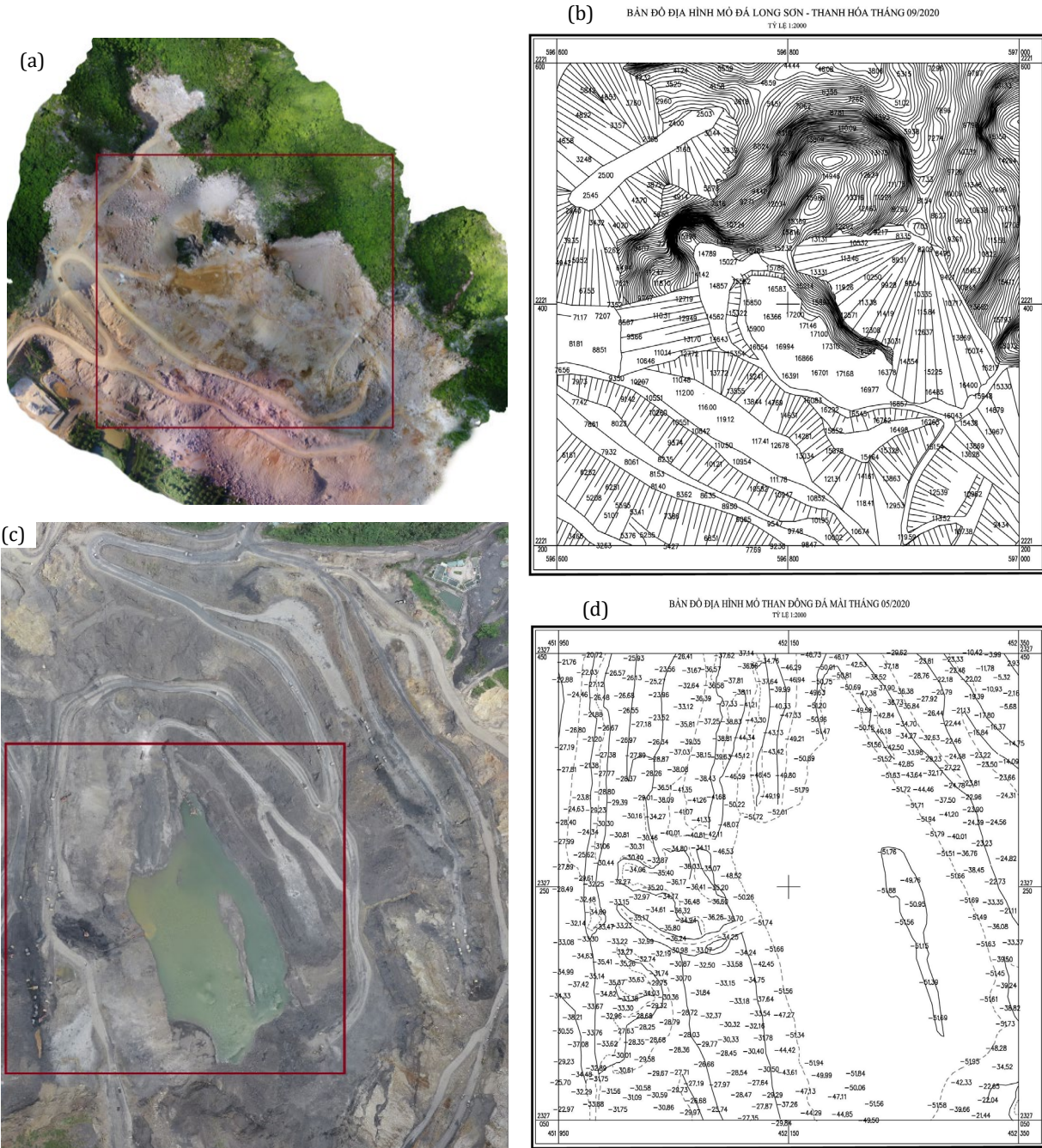
Hình 5. Mặt cắt địa hình và vị trí cất cánh UAV, (a) mỏ đá Long Sơn, (b) mỏ than Đông Đá Mài.

Bảng 4. Vị trí độ cao điểm UAV cất cánh khi đo vẽ bản đồ 1:500.

Tỷ lệ bản đồ	Số lượng vị trí điểm cất cánh	Vị trí cất cánh	Độ cao điểm cất cánh (m)	Chiều cao bay thiết kế tại điểm cất cánh	Khoảng độ cao địa hình bay chụp (m)	Chiều cao bay chụp lớn nhất (m)	Khu vực bay chụp
1:500	02	T1	-22	50	-60 ÷ +10	88	Mỏ Đông Đá Mài
		T2	+40	50	+10 ÷ +80	80	
		L1	+50	50	+10 ÷ +70	80	Mỏ Long Sơn
		L2	+80	50	+70 ÷ +100	85	

Bảng 5. Độ cao vị trí điểm UAV cất cánh khi đo vẽ bản đồ 1:1000 và 1:2000.

Tỷ lệ bản đồ	Số lượng vị trí cất cánh	Vị trí cất cánh	Độ cao điểm cất cánh (m)	Chiều bay thiết kế tại điểm cất cánh (m)	Độ cao địa hình bay chụp min ÷ max (m)	Chiều cao bay chụp lớn nhất (m)	Khu vực bay chụp
1:1000	01	T2	+40	80	-60 ÷ +80	80	Mỏ Đông Đá Mài
		L2	+50	80	+10 ÷ 100	90	Mỏ Long Sơn
1:2000	01	T2	+40	150	-60 ÷ +80	165	Mỏ Đông Đá Mài
		L2	+80	150	+10 ÷ 100	250	Mỏ Long Sơn



Hình 6. Ảnh trực giao và bản đồ địa hình: (a, b) mỏ Long Sơn; (c, d) mỏ Đông Đá Mài.

4.3.2. Công tác ngoại nghiệp

Các điểm khống chế ảnh mặt đất và các điểm kiểm tra được thiết kế phân bố đều trên khu vực đo vẽ và được đánh dấu trên thực địa bằng tiêu khống chế ảnh trước khi tiến bay chụp ảnh. Tại mỏ than Đông Đá Mài, số lượng điểm thành lập là 40, do mỏ đá Long Sơn diện tích nhỏ hơn nên số lượng điểm thành lập là 20. Đối sánh với số lượng cần

thiết tại Bảng 1 thì các điểm đang được bố trí với số lượng lớn hơn. Tuy nhiên, các điểm dư thừa sẽ được dùng vào mục đích đánh giá độ chính xác mô hình số bề mặt và ảnh trực giao. Điểm tiêu khống chế ảnh được đo nối tọa độ với các điểm mốc đường chuyền cấp 1 và đạt độ chính xác đường chuyền cấp 2.

Việc bay chụp UAV trên thực địa được thực hiện theo đúng quy trình đo vẽ với các thông số đã

tính toán: độ phủ trùm ảnh là 75%, góc chụp máy ảnh 90°, vị trí cất cánh của UAV trên thực địa tại hai mỏ được thực hiện theo đúng vị trí đã tính toán trên các Bảng 4 và 5.

4.3.3. Xử lý nội nghiệp

Quá trình xử lý ảnh UAV được thực hiện trên phần mềm Agisoft Metashape của hãng Agisoft LLC. Đây là phần mềm có nhiều ưu điểm hơn các phần mềm thương mại khác (Sona và nnk., 2014). Các bước xử lý trên phần mềm bao gồm: nhập ảnh bay chụp vào phần mềm; khớp ảnh (align photos); nắn ảnh và bình sai tam giác ảnh không gian (optimize); xây dựng đám mây điểm dày đặc (build dense cloud); tạo mô hình số độ cao (DEM) (build DEM); tạo ảnh trực giao (build orthophoto); xuất báo cáo và kết quả đánh giá độ chính xác (Agisoft, 2019). Khi kết quả đánh giá độ chính xác đã đáp ứng các yêu cầu theo quy phạm (Bộ Công Thương, 2015), xuất ảnh trực giao để số hóa trên phần mềm AutoCad, trong khi DEM hay DSM được sử dụng để lấy thông tin địa hình. Các khu vực không thể số hóa hay lấy thông tin địa hình chính xác, có thể đo đạc bổ sung bằng phương pháp toàn đạc. Bước cuối cùng là biên tập bản đồ và lập báo cáo, đóng gói sản phẩm.

Trong quá trình xử lý ảnh, hệ tọa độ địa phương VN2000 múi chiếu 3°, tương ứng với khu vực mỏ được thành lập để làm cơ sở đưa hệ tọa độ ảnh trực giao và mô hình số bề mặt sau khi thành lập nằm trong đúng hệ quy chiếu tọa độ phục vụ cho mục đích thành lập bản đồ theo đúng quy chuẩn tọa độ của Nhà nước. Mỏ than Đông Đá Mài thuộc tỉnh Quảng Ninh: kinh tuyến trực 107°45', mỏ đá Long Sơn thuộc tỉnh Thanh Hóa: kinh tuyến trực 105°00'.

a. Đánh giá độ chính xác mô hình số bề mặt phục vụ thành lập bản đồ cho mỏ than Đông Đá Mài

Độ chính xác DSM thành lập từ ảnh bay chụp UAV được tính toán theo sai số trung phương (Le và nnk., 2020b; Tomaštk và nnk., 2019) dựa vào các điểm KCA và điểm kiểm tra (ĐKT) đã thành lập. Để đánh giá được số lượng điểm khống chế ảnh cần thiết tương ứng với các tỷ lệ bản đồ 1:2000; 1:1000 và 1:500, các ĐKT được khảo sát theo số lượng tăng dần bắt đầu từ 03 điểm cho đến khi đạt độ chính xác thành lập bản đồ tỷ lệ tương ứng.

Mỏ than Đông Đá Mài với số lượng điểm mốc thành lập 40, trong đó có 07 điểm không đảm bảo yêu cầu độ chính xác nên đã loại bỏ. Sử dụng 33 điểm còn lại để nắn ảnh và đánh giá độ chính xác mô hình. Kết quả khảo sát độ chính xác mô hình số bề mặt (DSM) với số lượng các điểm khống chế ảnh khác nhau được thể hiện trong Bảng 6.

Dựa vào kết quả đánh giá độ chính xác mô hình trên Bảng 6, có thể thấy rằng, độ chính xác mô hình số bề mặt tăng lên khi số lượng điểm khống chế ảnh mặt đất tăng. Đối chiếu sai số với tiêu chuẩn thành lập bản đồ theo TCVN, cần 04 điểm KCA cho DSM đạt độ chính xác thành lập bản đồ 1:2000. Để thành lập bản đồ tỷ lệ 1:1000 và 1:500 số lượng điểm KCA tối thiểu tương ứng là 7 và 12 (Bảng 6).

b. Xử lý ảnh và đánh giá độ chính xác của các mô hình DSM mỏ Long Sơn

Việc đánh giá độ chính xác DSM của mỏ đá Long Sơn được thực hiện tương tự như ở mỏ Đông Đá Mài. Tổng số điểm KCA thành lập là 20, số điểm đủ điều kiện sử dụng là 18.

Bảng 6. Sai số trung phương của các điểm kiểm tra.

Số lượng điểm KCAs	Sai số trung phương (cm)				
	RMSE _x	RMSE _y	RMSE _z	RMSE _{xy}	RMSE _{xyz}
3	85,3	64,8	420,1	107,2	433,6
4	10,9	13,4	31,7	17,3	36,1
5	4,9	7,7	13,3	9,1	16,1
6	4,3	5,6	12,4	7,0	14,2
7	2,6	2,7	7,1	3,8	8,1
8	2,4	2,4	7,3	3,4	8,0
9	2,2	2,4	6,6	3,2	7,4
10	2,7	2,4	6,5	3,6	7,4
11	2,1	2,3	6,2	3,2	7,0
12	2,0	2,0	6,2	2,9	6,8

Độ chính xác mô hình DSM được đánh giá theo sai số trung phương của các điểm kiểm tra, đây là các điểm không tham gia vào quá trình nắn ảnh (Bảng 7). Kết quả chỉ ra rằng, với diện tích đo vẽ như mỏ Long Sơn thì cần tối thiểu 05 điểm khống chế ảnh mặt đất là đủ độ chính xác thành lập bản đồ tỷ lệ 1:2000; 06 điểm khống chế ảnh mặt đất là đủ độ chính xác thành lập bản đồ tỷ lệ 1:1000; và 07 điểm khống chế ảnh mặt đất là đủ độ chính xác thành lập bản đồ tỷ lệ 1:500.

Từ kết quả thực nghiệm tại mỏ đá Long Sơn, có thể thấy rằng, đối với mỏ khai thác đá lộ thiên (dương) với đặc điểm địa hình dốc khoảng 45 độ và diện tích đo vẽ khoảng 36 ha như tại mỏ đá Long Sơn, thì khi thành lập bản đồ các tỷ lệ 1:500, 1:1000 và 1:2000 cần tối thiểu tương ứng 05, 06 và 07 điểm khống chế để nắn ảnh khi thành lập mô hình DSM. Như vậy, 01 điểm KCA có thể khống chế được khu vực đo vẽ 05 ha, 06 ha và 07 ha tương ứng với các tỷ lệ bản đồ cần thành lập là 1:500, 1:1000 và 1:2000. Bên cạnh đó chiều cao bay chụp so với điểm thấp nhất của địa hình cần tuân thủ theo quy trình đề xuất tương ứng đối với các tỷ lệ 1:500, 1:1000 và 1:2000 là nhỏ hơn 100 m, 200 m và 350 m.

c. Số hóa và biên tập bản đồ địa hình

Sau khi đánh giá độ chính xác các sản phẩm xử lý ảnh UAV với kết quả đạt yêu cầu của các quy định hiện hành (Thông tư số 07/2021/TT-BTNMT và số 68/2015/TT-BTNMT được Bộ Tài nguyên và Môi trường ban hành), các sản phẩm này (ảnh trực giao và DSM) được sử dụng cho công tác số hóa, biên vẽ địa hình và địa vật khu vực mỏ lộ thiên. Các phần mềm chuyên dụng như TOPO, AutoCAD, Global Mapper, QGIS và ArcGIS có thể được sử dụng cho công việc này. Ảnh trực giao với độ phân giải cao cỡ cm, được sử dụng để số hóa địa vật, trong khi đó, mô hình DSM là cơ sở

để vẽ điểm độ cao và đường bình độ, biểu diễn địa hình. Hình 6 thể hiện hai sản phẩm là ảnh trực giao và bản đồ địa hình của hai mỏ Long Sơn và Đông Đá Mài.

5. Kết luận

Quy trình thành lập bản đồ địa hình tỷ lệ lớn cho các mỏ lộ thiên bằng thiết bị bay không người lái UAV cất cánh thẳng đứng đã được thiết lập. Quy trình này được kiểm chứng thông qua thực nghiệm bay chụp ảnh địa hình tại mỏ than Đông Đá Mài và mỏ đá Long Sơn. Kết quả cho thấy:

- UAV cánh quạt cất cánh thẳng đứng có nhiều ưu điểm trong điều kiện thực tế tại các mỏ khai thác lộ thiên Việt Nam như: chi phí đầu tư thấp, khả năng vận hành linh hoạt và quan trọng là đảm bảo được yêu cầu về độ chính xác trong thành lập bản đồ địa hình tỷ lệ lớn;

- Quy trình chặt chẽ về mặt kỹ thuật, rõ ràng và dễ thực hiện, đảm bảo các điều kiện về an toàn và hiệu quả, phù hợp với thực tế đo vẽ tại mỏ lộ thiên có sự thay đổi địa hình phức tạp;

- Cần tính toán chiều cao bay chụp để có độ phân giải ảnh mặt đất đạt yêu cầu tỷ lệ bản đồ cần thành lập. Với địa hình có chênh cao thay đổi lớn thì nên chia theo nhiều vị trí cất cánh ở các mức độ cao khác nhau để đảm bảo an toàn cho máy bay và đảm bảo độ chính xác thành lập được;

Khi ứng dụng máy bay giá thành thấp như thiết bị DJI Phantom 4 Pro vào thực tế sản xuất, phải tuân thủ các tiêu chuẩn kỹ thuật của quy trình. Cụ thể là chiều cao bay chụp so với điểm thấp nhất của địa hình phải nhỏ hơn 100 m, 200 m và 350 m tương ứng với các bản đồ tỷ lệ 1:500, 1:1000 và 1:2000. Với đặc điểm địa hình dốc đứng từ 45 đến 70 độ và diện tích khoảng 30÷50 ha thì cần ít nhất 01 điểm khống chế ảnh cho diện tích 04 ha, 06 ha và 07 ha tương ứng đối với tỷ lệ bản đồ cần thành lập là 1:500, 1:1000 và 1:2000.

Bảng 7. Sai số trung phương X, Y, Z, XY và XYZ của các điểm kiểm tra.

Số lượng điểm KCAs	Sai số trung phương (cm)				
	RMSE _x	RMSE _y	RMSE _z	RMSE _{xy}	RMSE _{xyz}
DSM 1:1000					
5	0,061	0,008	0,078	0,062	0,099
DSM 1:2000					
6	0,035	0,019	0,044	0,040	0,059
DSM 1:500					
7	0,024	0,026	0,027	0,020	0,040

Đóng góp của các tác giả

Nguyễn Quốc Long - lập đề cương, viết bản thảo, phân tích và đánh giá kết quả; Lê Thị Thanh Tâm - một phần nội dung, sửa bản thảo; Lê Văn Cảnh - xử lý số liệu, viết một phần nội dung; Cao Xuân Cường - xử lý số liệu, viết một phần nội dung; Đặng Tuyết Minh - tham gia thu thập dữ liệu và viết một phần nội dung; Nguyễn Bá Dũng - đánh giá kết quả và sửa bản thảo.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Bộ Giáo dục và Đào tạo và Tổng Công ty Đông Bắc đã hỗ trợ kinh phí để thực hiện thực nghiệm trong khuôn khổ đề tài B2020-MĐA-14.

Tài liệu tham khảo

Agisoft. (2019). *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition*, Version 1.5.

Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-& Carricondo, P. (2017). Accuracy of Digital Surface Models and Orthophotos Derived from Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry. *Journal of Surveying Engineering*, 143(2), 04016025. doi:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428 000 0206.

ASPRS. (2015). New Asprs Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data Released. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81(4), 277. doi:https://doi.org/10.1016/S0099-1112(15)30074-4.

Bộ Công Thương. (2015). *Tiêu chuẩn Việt Nam ngành Trắc Địa Mỏ*. Hà Nội. Viện tiêu chuẩn quốc gia Việt Nam.

Bộ Tài nguyên và Môi trường. (2015). *Thông tư 68/2015/TT-BTNMT: Quy định kỹ thuật đo đạc trực tiếp địa hình phục vụ thành lập bản đồ địa hình và cơ sở dữ liệu nền địa lý tỷ lệ 1:500, 1:1000, 1:2000, 1:5000*. Hà Nội.

Bộ Tài nguyên và Môi trường. (2021). *Quy định kỹ thuật thu nhận và xử lý dữ liệu ảnh số từ tàu bay không người lái phục vụ xây dựng, cập nhật cơ sở dữ liệu nền địa lý quốc gia tỷ lệ 1:2.000, 1:5.000 và thành lập bản đồ địa hình tỷ lệ 1:500, 1:1.000*, Hà Nội.

Bui, T. D., Nguyen Q. L., Bui, X. N., Nguyen, V. N., Pham, V. C., Le, V. C., Bjørn, K. (2017). Lightweight Unmanned Aerial Vehicle and Structure-from-Motion Photogrammetry for Generating Digital Surface Model for Open-Pit Coal Mine Area and Its Accuracy Assessment. *International Conference on Geo-Spatial Technologies and Earth Resources*, 17-33.

Công ty cổ phần công nghệ Nguyễn Kim. (2020). *Máy toàn đạc điện tử Topcon ES -105*, <https://thietbidodac.vn>.

China, G. B. (2008). *Specifications for aerophotogrammetric office operation of 1:500, 1:1.000, 1:2.000 topographic maps*. China National Standardization Management Committee.

Cryderman, C., Mah, S. B., Shufletoski, A. (2014). Evaluation of UAV Photogrammetric Accuracy for Mapping and Earthworks Computations. *Geomatica*, 68(4), 309-317. doi: 10.5623/cig2014-405.

DJI. (2017). *DJI Phantom 4 Professional Visionary Intelligence Elevated Imagination*. <https://www.dji.com/phantom-4-pro>

DJI. (2020). *Phantom 4 RTK Visionary Intelligence*, <https://www.dji.com/phantom-4-rtk>.

Đỗ, T. S., Nguyễn, A. T., Hoàng, H., Võ. T. L., Nguyễn, N. T. V, Võ, V. T., Lê, N. T.P., Phạm, T. T. A., & Đặng, M. Q. (2019). Kết hợp dữ liệu đám mây điểm từ các thiết bị 3D Laser scanning và phương tiện bay không người lái (UAV) nhằm thu thập thông tin mô hình công trình xây dựng. *Tạp chí Xây Dựng Việt Nam*, 4, 39-42.

Jacobsen, K. (2005). *Photogrammetry and geoinformation trends in large scale mapping*.

Lê, V. C., Cao, X. C., Lê, T. T. H. (2020a). Nghiên cứu lựa chọn vị trí cất cánh phù hợp với điều kiện địa hình ở mỏ lộ thiên cho thiết bị bay không người lái có tích hợp GNSS động khi đo vẽ thành lập bản đồ địa hình tỷ lệ lớn. *Tạp chí Khoa học kỹ thuật Mỏ - Địa chất*, 61(05), 54-63. DOI:10.46326/JMES.2020.61(5).06

Le, V. C., Cao, X. C., Nguyen, Q. L., Le, T. T. H., Tran, T. A., & Bui, X. N. (2020b). Experimental Investigation on the Performance of DJI Phantom 4 RTK in the PPK Mode for 3D

- Mapping Open - Pit Mines. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 2, 65-74. doi: <http://doi.org/10.29227/IM-2020-02-10>.
- Lee, S., & Choi, Y. (2015). Topographic survey at small-scale open-pit mines using a popular rotary-wing unmanned aerial vehicle (drone). *Tunnel and Underground space*, 25(5), 462-469.
- Lee, S., & Choi, Y. (2016). Reviews of unmanned aerial vehicle (drone) technology trends and its applications in the mining industry. *Geosystem Engineering*, 19(4), 197-204.
- Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F. J., García-Ferrer, A., & Pérez-Porras, F. J. (2018). Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 72, 1-10. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.015>
- Nguyễn, Q. L. (2021a). *Nghiên cứu đề xuất qui trình thành lập bản đồ địa hình tỷ lệ lớn 1:2000, 1:1000 và 1:500 cho địa hình khu vực mỏ lộ thiên tại Việt Nam trên cơ sở ứng dụng UAV giá thành thấp và máy ảnh thông thường*. Đề tài cấp Bộ, mã số B2020-MDA-14.
- Nguyen, Q. L. (2021b). Accuracy assessment of open-pit mine's digital surface models generated using photos captured by Unmanned Aerial Vehicles in the post-processing kinematic mode. *Journal of Mining and Earth Sciences*, 62(4), 38-47. DOI:10.46326/JMES.2021.62(4).05
- Nguyen, Q. L., Goyal, R., Bui, K. L., Cao, X. C., Le, V. C., Nguyen, Q. M., & Bui, X. N. (2021c). Optimal choice of the number of ground control points for developing precise DSM using light-weight UAV in small and medium-sized open-pit mine. *Archives of Mining Sciences*, 66(3), 369-384.
- Nguyen, Q. L., Goyal, R., Le, V. C., Cao, X. C., Pham, V. C., Bui, N. Q., & Bui, K. L. (2020a). Influence of Flight Height on The Accuracy of UAV Derived Digital Elevation Model at Complex Terrain. *Inzynieria Mineralna*, 45(1), 179-187.
- Nguyen, Q. L., Le, T. T. H., Tong, S. S., & Kim, T. T. H. (2020b). UAV Photogrammetry-Based For Open Pit Coal Mine Large Scale Mapping, Case Studies In Cam Pha City, Vietnam. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 12(4), 501-509.
- Nguyễn, Q. L., Cao, X. C. (2019). Ứng dụng máy bay không người lái (UAV) để xây dựng mô hình số bề mặt và bản đồ mỏ lộ thiên khai thác vật liệu xây dựng. *Công nghiệp mỏ*, 1, 21.
- Sona, G., Pinto, L., Pagliari, D., Passoni, D., & Gini, R. (2014). Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images. *Earth Science Informatics*, 7(2), 97-107. doi:10.1007/s12145-013-0142-2.
- Taddia, Y., Stecchi, F., Pellegrinelli, A. (2020). Coastal Mapping using DJI Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic Mode. *Drones*, 4(2), 9. doi:10.3390/drones4020009.
- Tomaščík, J., Mokros, M., Surovy, P., Grznárová, A., & Merganič, J. (2019). UAV RTK/PPK Method - An Optimal Solution for Mapping Inaccessible Forested Areas. *Remote Sensing*, 11, 721. doi: 10.3390/rs11060721.
- Võ, C. M., Nguyễn, Q. L. (2014). Tích hợp giả vệ tinh và GPS/PPK góp phần nâng cao hiệu quả kỹ thuật và kinh tế công tác đo vẽ bản đồ mỏ lộ thiên khai thác xuống sâu. *Tạp chí Công nghiệp mỏ*, 4.
- Võ, C. M., Võ, N. D., Nguyễn, Q. L., & Đình, C. Đ. (2010). Khả năng ứng dụng công nghệ định vị toàn cầu (GPS) quản lý hoạt động các phương tiện vận tải trong các mỏ lộ thiên Việt Nam, *Tạp chí Công nghiệp Mỏ*, 1.
- Xiang, J., Chen, J., Sofia, G., Tian, Y., & Tarolli, P. (2018). Open-pit mine geomorphic changes analysis using multi-temporal UAV survey. *Environmental earth sciences*, 77(6), 1-18.