

Bài báo khoa học

Xây dựng mô hình số 3D địa hình đáy biển dựa trên phương pháp đường cong tham số

Nguyễn Đình Hải¹, Phạm Ngọc Quang^{2,3*}

¹ Đoàn Đo đạc, biên vẽ hải đồ và nghiên cứu biển; hthhaithem@gmail.com

² Khoa Trắc địa - Bản đồ và Quản lý đất đai, Trường Đại học Mở - Địa chất;
phamngocquang@humg.edu.vn

³ Nhóm nghiên cứu Trắc địa cao cấp - môi trường, Trường Đại học Mở - Địa chất

*Tác giả liên hệ: phamngocquang@humg.edu.vn; Tel.: +84-973037551

Ban biên tập nhận bài: 5/12/2023; Ngày phản biện xong: 17/1/2024; Ngày đăng bài: 25/5/2024

Tóm tắt: Bản đồ địa hình đáy biển, hải đồ và mô hình số 3D địa hình đáy biển là những loại thông tin (hoặc công cụ) hết sức cần thiết đối với các hoạt động trên biển. Với ưu điểm cung cấp thông tin một cách trực quan nhất, mô hình số 3D địa hình đáy biển đang được ưu tiên nghiên cứu xây dựng trên thế giới trong thời gian gần đây. Tại Việt Nam, do đặc thù về khả năng tiếp cận dữ liệu mà các nghiên cứu về xây dựng mô hình số 3D địa hình đáy biển còn hết sức hạn chế. Một trong những nội dung trong quy trình xây dựng mô hình số 3D địa hình đáy biển đó là nội suy các điểm độ sâu và xây dựng bề mặt mô hình số 3D. Chất lượng của mô hình số 3D được xây dựng phụ thuộc vào nhiều yếu tố trong đó phương pháp nội suy điểm độ sâu cũng như xây dựng bề mặt của mô hình số 3D. Nghiên cứu này đề xuất sử dụng thuật toán Cubic Spline để nội suy điểm đo sâu cũng như xác định bề mặt của mô hình số 3D địa hình đáy biển. Trên cơ sở thuật toán và quy trình đã đề xuất, tiến hành thực nghiệm xây dựng mô hình số 3D địa hình đáy biển cho khu vực biển Nha Trang - Khánh Hòa. Kết quả đánh giá độ chính xác cho thấy, mô hình đã xây dựng có độ chính xác xác định độ sâu với sai số trung phương $m = \pm 0,465m$. Độ chính xác mô hình đã xây dựng hoàn toàn đáp ứng yêu cầu xây dựng mô hình số 3D địa hình đáy biển.

Từ khóa: 3D; Địa hình đáy biển; Phương pháp nội suy; Spline.

1. Giới thiệu

Bản đồ địa hình đáy biển là công cụ hết sức cần thiết trong dẫn đường trên biển, nghiên cứu biển cũng như xây dựng các công trình trên biển,... Để thành lập bản đồ địa hình đáy biển, sử dụng nhiều công nghệ thu thập dữ liệu khác nhau như đo sâu hồi âm đơn tia, đo sâu hồi âm đa tia, thủy âm quét sườn ... [1]. Bản đồ địa hình đáy biển có thể được thành lập ở dạng bản đồ 2 chiều (2D) hoặc bản đồ 3 chiều (3D). Một trong những ưu điểm của bản đồ địa hình đáy biển 3D đó là cho phép hiển thị một cách trực quan địa hình đáy biển. Mô hình số 3D địa hình đáy biển biểu diễn toàn cảnh và chi tiết hóa về cấu trúc và hình dạng của đáy biển dưới dạng mô hình toàn cảnh 3D. Mô hình nêu trên cho phép người sử dụng theo dõi trực quan không chỉ địa hình đáy biển mà còn cả các đối tượng như trầm tích, sinh vật ... dưới đáy biển. Vì lý do nêu trên, xây dựng mô hình 3D địa hình đáy biển là một hướng nghiên cứu rất được coi trọng.

Các tác giả [2] đã giới thiệu về dự án thành lập bản đồ đáy đại dương trên phạm vi toàn thế giới. Trong dự án này, các tiêu chuẩn tối thiểu về độ chính xác của dữ liệu, điều hướng pixel và độ phân giải đã được khuyến nghị. Nghiên cứu [3] đã tổng quan về khoa học quan

sát địa hình đáy biển trong đó nhấn mạnh tầm quan trọng của mạng lưới quan trắc đáy biển đa mục tiêu. Dữ liệu đo sâu hồi âm đơn tia là loại dữ liệu đo sâu hồi âm xuất hiện sớm nhất. Dữ liệu thu nhận được bởi phương pháp này ở dạng các đường rời rạc do đó không phản ánh hết hình dạng địa hình đáy biển trên thực tế. Tuy nhiên, loại dữ liệu này cũng đã có vai trò lớn trong xây dựng bản đồ địa hình đáy biển. Các tác giả [4] đã đánh giá độ chính xác của các thuật toán nội suy để xây dựng mô hình 3D địa hình đáy biển từ dữ liệu đo sâu hồi âm đơn tia. Trong nghiên cứu này, đã sử dụng các thuật toán nội suy như: thuật toán nghịch đảo khoảng cách, hàm radian xuyên tâm (*RBF - Radian Basic Function*), hàm nội suy đa thức tổng quát, hàm nội suy đa thức cục bộ và Kriging. Quá trình thực nghiệm được tính toán bằng cách sử dụng các công cụ có sẵn trong bộ phần mềm ArcGIS 10.3. Kết quả thực nghiệm cho thấy, hàm radian xuyên tâm và Kriging cho độ chính xác tốt nhất với tập dữ liệu thực nghiệm. Nghiên cứu [5] đã sử dụng hàm nội suy Spline kết hợp với hàm Green di động (*MGF - Moving Green Function*) để nội suy dữ liệu đo sâu phục vụ xây dựng mô hình số 3D địa hình đáy biển. Nghiên cứu đã thực nghiệm với hai phương án: (1) Sử dụng hàm nguyên thủy và (2) đề xuất hàm cải tiến. Kết quả thực nghiệm cho thấy hàm nội suy Spline kết hợp với kỹ thuật Green di động cải tiến cho độ chính xác tốt hơn, thời gian thực thi ngắn hơn so với hàm nguyên thủy. Nghiên cứu [6] đã sử dụng hàm Kriging để mô hình hóa 3D địa hình đáy biển. Trong nghiên cứu này, thuật toán Kriging thông thường và Kriging phổ quát đã được sử dụng. Để đánh giá hiệu suất của quá trình mô hình hóa, các tác giả đã đề xuất chỉ số biến đổi hình thái (*MVI - Morphological Variation Index*) được sử dụng để đo lường mức độ biến đổi của hình dạng đáy biển. Kết quả thực nghiệm trong nghiên cứu này đã cho thấy mức độ hiệu quả của hàm Kriging trong mô hình hóa địa hình đáy biển. Bên cạnh đó, MVI là chỉ số hữu ích để đại diện cho sự biến đổi của đáy biển dưới dạng một giá trị duy nhất.

Từ dữ liệu đo sâu, hình dáng địa hình đáy biển thường được mô hình hóa ở dạng mô hình số độ cao (DEM). Độ chính xác của mô hình DEM được xây dựng phụ thuộc nhiều yếu tố như độ chính xác dữ liệu đo sâu, thuật toán nội suy, mật độ dữ liệu,... Tác giả [7] đã đánh giá độ chính xác nội suy độ sâu để mô hình hóa địa hình đáy biển. Các thuật toán được sử dụng bao gồm nghịch đảo khoảng cách, Spline và nội suy theo tam giác. Kết quả cho thấy độ chính xác của ba kỹ thuật nội suy được đánh giá giảm: (i) ở mật độ lấy mẫu ô nhỏ hơn, (ii) khi khoảng cách đến điểm đo gần nhất tăng lên và (iii) ở những khu vực có độ dốc và độ cong cao. Spline được cho là kỹ thuật chính xác nhất, mặc dù tất cả các kỹ thuật đều có độ chính xác xấp xỉ tương đương ở mật độ lấy mẫu dữ liệu lớn và khoảng cách nội suy ngắn hơn [7].

Generic Mapping Tools (GMT) là một bộ công cụ phần mềm mã nguồn mở được sử dụng rộng rãi trong địa lý, địa chất, và nghiên cứu đại dương để tạo và hiển thị các bản đồ và biểu đồ khoa học. GMT cung cấp một loạt các lệnh và dòng lệnh cho việc xử lý dữ liệu không gian, vẽ đồ thị, và tạo bản đồ. Tác giả [8] đã sử dụng GMT để xây dựng đồ họa đáy biển tại một số khu vực của Đại Tây Dương. Công trình này góp phần mở rộng kiến thức về sự phát triển địa chất và kiến tạo đáy biển Đại Tây Dương nhằm hoàn thiện quan điểm về địa mạo đáy biển tại khu vực nghiên cứu. Polina LEMENKOVA [9] cũng đã sử dụng GMT để xây dựng mô hình địa vật lý của rãnh đại dương khu vực Trung Mỹ. Địa hình của rãnh Aleutian về phía đông nam ngoài khơi Bowers Ridge, biển Bering cũng được tác giả Polina [10] sử dụng GMT để phân tích. Công trình này góp phần hiểu biết chi tiết hơn về độ sâu đáy biển Thái Bình Dương, cụ thể hơn là đoạn được chọn của Rãnh Aleutian gần khu vực Bowers Ridge.

Một trong những công nghệ thu nhận tín hiệu để thành lập bản đồ địa hình đáy biển đó là hệ thống máy đo hồi âm đa tia (MBE) [12]. Mỗi hệ thống MBE bao gồm nhiều hệ thống đo lường như đầu sonar, hệ thống định vị, cảm biến chuyển động hoạt động đồng bộ. Bên cạnh đó, công nghệ đo sâu SONAR cũng đã được phát triển để có thể lập mô hình 3D địa hình đáy biển một cách trực quan với độ chính xác cao [13]. Diện tích biển và đại dương của thế giới rất rộng lớn, nếu thu thập dữ liệu địa hình đáy biển theo các phương pháp truyền

thống sẽ cần rất nhiều thời gian để thực hiện. Các thiết bị thu nhận dữ liệu địa hình đáy biển tự động (AUV) đã được chế tạo để phần nào khắc phục được các nhược điểm nêu trên [14]. Các tác giả [14] đã đề xuất phương pháp ghép ảnh, khôi phục màu dữ liệu thu nhận bởi AUV để xây dựng mô hình 3D địa hình đáy biển.

Mô hình 3D địa hình khu vực đới bờ (phần tiếp giáp giữa biển và đất liền) có ý nghĩa hết sức quan trọng trong nghiên cứu tai biến thiên tai. Các tác giả [15] đã đề xuất phương pháp LIDAR để thu nhận dữ liệu phục vụ cho xây dựng mô hình 3D như đã nêu trên.

Sau khi xây dựng mô hình, một vấn đề hết sức cần thiết đó là hiển thị mô hình 3D. Tác giả [16] đã đề xuất phương pháp hiển thị 3D khu vực đới bờ trên cơ sở sử dụng ngôn ngữ lập trình C++ và OpenGL để xây dựng hệ thống hiển thị 3D giúp hiện thực hóa trực quan hóa địa hình 3D thực tế của vùng ven biển bằng cách tạo đường bờ tức thời. Trên cơ sở dữ liệu đo SONAR, đo sâu đa tia và sử dụng công cụ phân tích hệ thống thông tin địa lý đã xác định được thông tin về địa hình đáy biển [17].

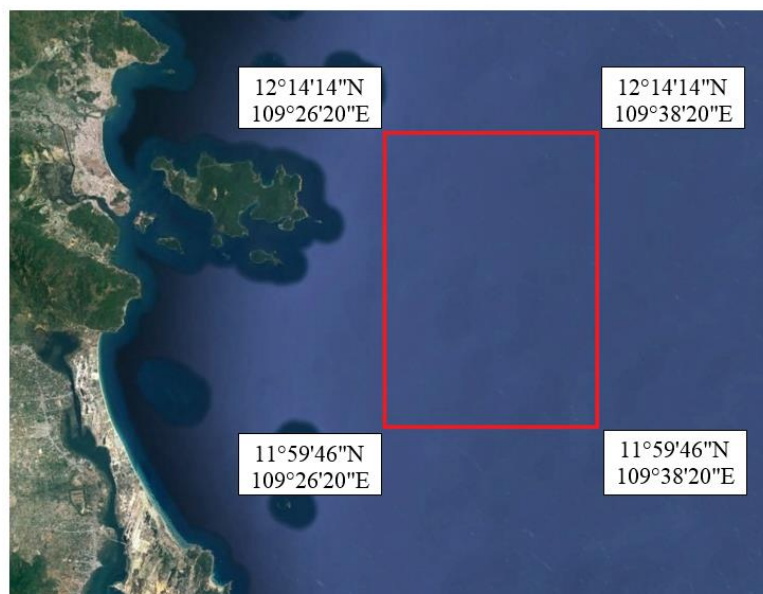
Cho đến nay đã có một số công trình nghiên cứu về thành lập bản đồ địa hình đáy biển tại Việt Nam, [18] đã chứng minh về tính hiệu quả của máy đo sâu hồi âm đa tia trong công tác khảo sát địa hình đáy biển phục vụ khảo sát công trình. Tại các khu vực ven bờ, dữ liệu ảnh viễn thám đã được ứng dụng trong xác định độ sâu địa hình đáy biển [19]. Trong nghiên cứu này, dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel-2A đã được sử dụng để xác định độ sâu cho những khu vực có độ sâu tới -10m với độ chính xác đáp ứng tiêu chuẩn thành lập bản đồ 1/10.000. Các tác giả [20] đã sử dụng giá trị trọng lực xác định địa hình và độ dày lớp vỏ trái đất bên dưới biển Đông. Phương pháp đánh giá độ chính xác dữ liệu đo sâu đơn tia phục vụ thành lập bản đồ địa hình đáy biển cũng đã được công bố [21]. Để thực hiện được công việc này, các tác giả đã đề xuất thuật toán và xây dựng chương trình máy tính. Kết quả thực nghiệm cho thấy, công cụ máy tính đã được xây dựng hoàn toàn đáp ứng yêu cầu của công tác đánh giá dữ liệu đo sâu đơn tia. Đặc điểm địa hình, đặc điểm của biển đảo địa hình khu vực đảo Trường Sa đã được các tác giả [22] phân tích trên cơ sở sử dụng mô hình MIKE. Kết quả của nghiên cứu này làm cơ sở khoa học để phân tích địa hình đáy biển phục vụ cho các hoạt động tác chiến của quân đội.

Có thể thấy rằng, các nghiên cứu về xây dựng mô hình 3D địa hình đáy biển tại Việt Nam vẫn còn hết sức hạn chế. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu xây dựng mô hình số 3D địa hình đáy biển từ dữ liệu đo sâu đa tia sử dụng đường cong tham số xác định được trên cơ sở ứng dụng thuật toán Cubic Spline.

2. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Khu vực và dữ liệu nghiên cứu

Khu vực được lựa chọn để nghiên cứu là khu vực biển Nha Trang - Khánh Hòa có vị trí được thể hiện như hình 1. Khu vực này có độ sâu trung bình từ -20m đến -80m. Dữ liệu được thu nhận sử dụng hệ thống đo sâu đa tia nước nông SeaBeam 1180 tần số hoạt động 180kHz, hệ thống đa tia nước sâu 3030 tần số 30kHz và thiết bị quét sườn Side Scan Sonar Klein 3000 tần số hoạt động 100kHz và 500kHz



Hình 1. Khu vực biển Nha Trang.

cùng với thiết bị thu thập tọa độ Trimble SPS 361. Hệ thống đo độ sâu nước nông đa tia SeaBeam 1180 là sản phẩm của công ty Wartsila Elac-Đức. Nó hoạt động ở tần số 180 kHz, phát sóng dưới dạng hình chữ T, có thể quét với góc lên đến 1400 và dải quét 200m ở độ sâu trung bình 50m. Hệ thống này được điều khiển thông qua phần mềm SeaBat UI Control để thu thập dữ liệu một cách nhanh chóng và chính xác. Với khả năng khảo sát chi tiết địa hình nước nông, độ phân giải cao, cùng khả năng thu thập dữ liệu tán xạ với độ chi tiết cao, hệ thống này được sử dụng để thu thập dữ liệu ở lòng hồ và khu vực ven đảo với độ sâu từ 0÷500m. Độ chính xác tọa độ, độ sâu đạt các hạn sai từ hạng đặc biệt tới hạng 2 theo tiêu chuẩn S-44 v5 (IHO).

2.2. Thuật toán Cubic Spline

Cubic Spline là một phương pháp nội suy được sử dụng để xây dựng đường cong mượt mà và liên tục thông qua một tập hợp các điểm dữ liệu đã biết. Được sử dụng rộng rãi trong đồ họa máy tính, xử lý ảnh và các ứng dụng khác, thuật toán Cubic Spline cung cấp một cách hiệu quả để biểu diễn và xử lý dữ liệu hình ảnh hoặc số liệu như số liệu địa hình [23]. Theo tài liệu [24] có thể diễn giải ngắn gọn cách tạo đường cong cubic spline từ tập điểm chi tiết như sau:

Bước 1: Chuẩn bị dữ liệu

Dữ liệu đầu vào ở đây là dữ liệu dạng 3 chiều của các điểm đo sâu với yêu cầu các thành phần tọa độ được sắp xếp theo trình tự giảm dần về độ lớn theo một hoặc nhiều trục.

Bước 2: Tính khoảng cách giữa các điểm liền kề nhau

Chia khoảng giữa mỗi cặp điểm thành các đoạn đường và xây dựng một đa thức Cubic Spline cho mỗi chiều (x, y, z). Mỗi chiều có một đa thức Cubic Spline tương ứng.

Đối với mỗi chiều, đa thức Cubic Spline có dạng:

$$S_i(t) = a_i + b_i(t - t_i) + c_i(t - t_i)^2 + d_i(t - t_i)^3 \tag{1}$$

Trong đó $S_i(t)$ là đa thức cubic spline cho đoạn đường thứ i, và a_i, b_i, c_i, d_i là các hệ số cần được xác định.

Bước 3: Xác định điều kiện liên tục và liên tục bậc 2

Để đảm bảo tính liên tục và liên tục bậc hai, áp dụng các điều kiện sau tại mỗi điểm nội suy:

$$S_i(t_i) = P_i \text{ (với } P_i \text{ là tọa độ tương ứng theo chiều x, y hoặc z)}$$

$$S_{i-1}(t_i) = S_i(t_i) \text{ (tính liên tục)}$$

$$S'_{i-1}(t_i) = S'_i(t_i) \text{ (tính liên tục bậc hai)}$$

Bước 4: Giải hệ phương trình

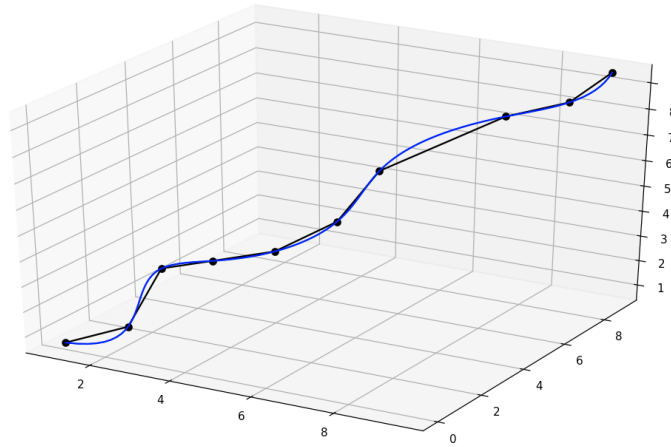
Giải hệ phương trình tuyến tính cho mỗi chiều để xác định các hệ số a_i, b_i, c_i, d_i . Giả sử rằng các điểm được cho theo thứ tự $a = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n = b$ và đặt $h_i = t_{i+1} - t_i$.

$Ax = b$ khi

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ h_0 & 2(h_0+h_1) & h_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_1 & 2(h_1+h_2) & h_2 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(h_2+h_3) & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{3}{h_1}(a_2 - a_1) - \frac{3}{h_0}(a_1 - a_0) \\ \dots \\ \frac{3}{h_{n-1}}(a_n - a_{n-1}) - \frac{3}{h_{n-2}}(a_{n-1} - a_{n-2}) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Bước 5: Áp dụng đa thức Spline

Sau khi có được các hệ số a_i, b_i, c_i, d_i , đa thức Spline được xây dựng cho mỗi đoạn đường và sử dụng để nội suy giá trị tại các điểm không biết. Quá trình này tạo ra một đường cong mượt mà và liên tục qua các điểm chi tiết như hình 2.



Hình 2. Đường cong Cubic Spline.

2.2. Phương pháp xây dựng mô hình số 3D địa hình đáy biển dựa trên phương pháp đường cong tham số

Các bước thực hiện trong trường hợp này như sau:

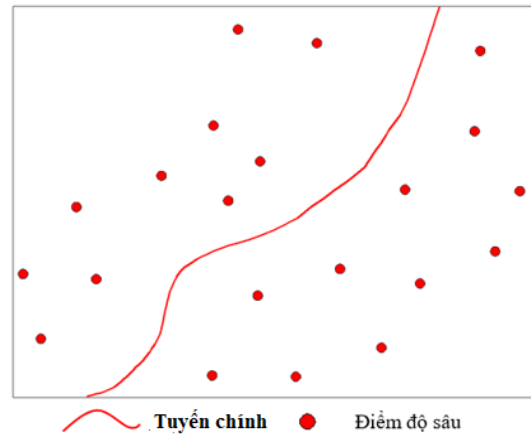
Bước 1: Xác định tuyến chính trên nền các điểm độ sâu (Hình 3)

Bước 2: Xác định các tuyến liên kề với tuyến chính (Hình 4)

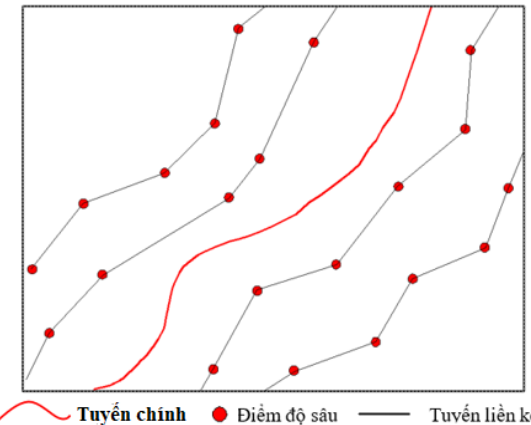
Các tuyến chính và tuyến liên kề được xác định dựa vào khoảng cách tối thiểu giữa các điểm đo sâu chi tiết, căn cứ vào các thông số này sẽ xác định được tuyến đầu tiên.

Bước 3: Xây dựng đường cong Cubic Spline đi qua các điểm của tuyến liên kề (Hình 5)

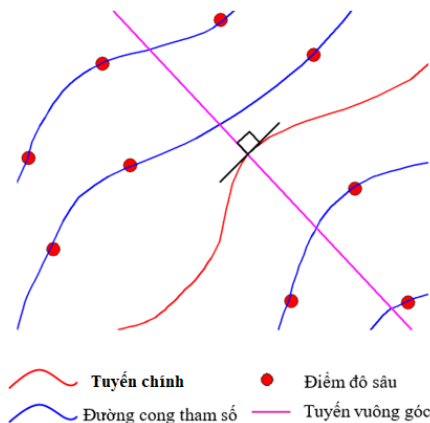
Bước 4: Xác định các mặt vuông góc với tuyến chính, cắt các đường cong tham số tại các vị trí mới (Hình 6).



Hình 3. Xác định tuyến chính trên nền các điểm độ sâu.

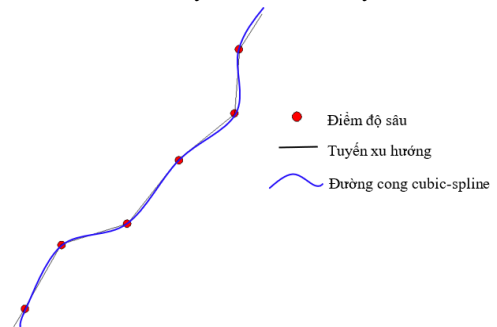


Hình 4. Xác định tuyến liên kề với tuyến chính.

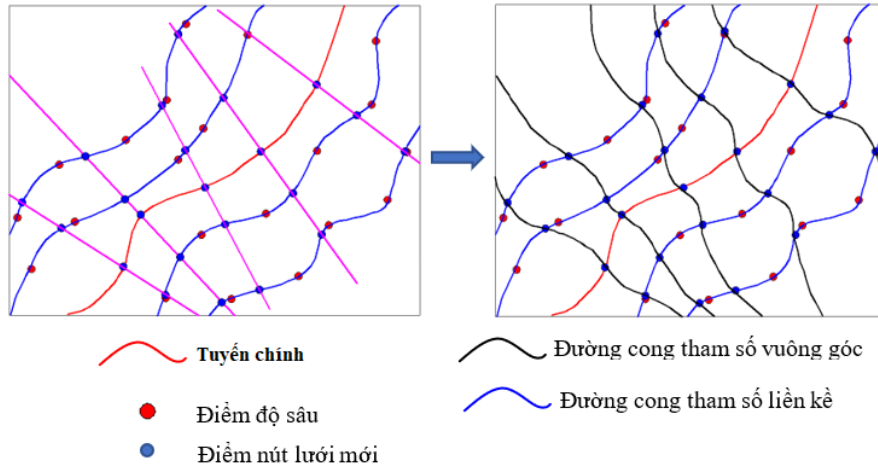


Hình 6. Xác định đường vuông góc với tuyến chính.

Mỗi mặt vuông góc sẽ cắt đường cong tham số liên kề tại 1 số điểm, lựa chọn các điểm này để tiếp tục xây dựng đường cong Cubic Spline theo hướng vuông góc. Như vậy sẽ được lưới tứ giác cong như hình 7.

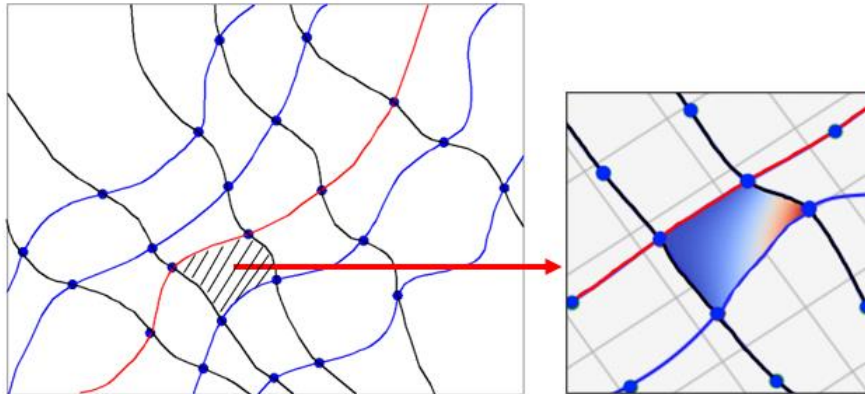


Hình 5. Đường cong Cubic Spline đã xác định được.



Hình 7. Lưới tứ giác cong xác định được theo thuật toán Cubic Spline.

Bước 5: Xây dựng mặt tứ giác cong không gian



Hình 8. Mặt tứ giác cong không gian.

Độ chính xác của mô hình được thành lập theo phương pháp như trên được đánh giá thông qua hai tiêu chí:

- Sai số trung phương RMSE:

$$RMSE_Z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{di} - Z_{ri})^2} \quad (2)$$

Trong đó $RMSE_Z$ là giá trị sai số trung phương; Z_{di} là giá trị độ cao thứ i trên bề mặt DEM kết quả của phương pháp tái chia mẫu; Z_{ri} là giá trị độ cao thứ i trên bề mặt mô hình tham khảo; n là số lượng điểm độ cao kiểm tra.

- Sai số trung bình:

$$ME_Z = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{di} - Z_{ri}) \right] \quad (3)$$

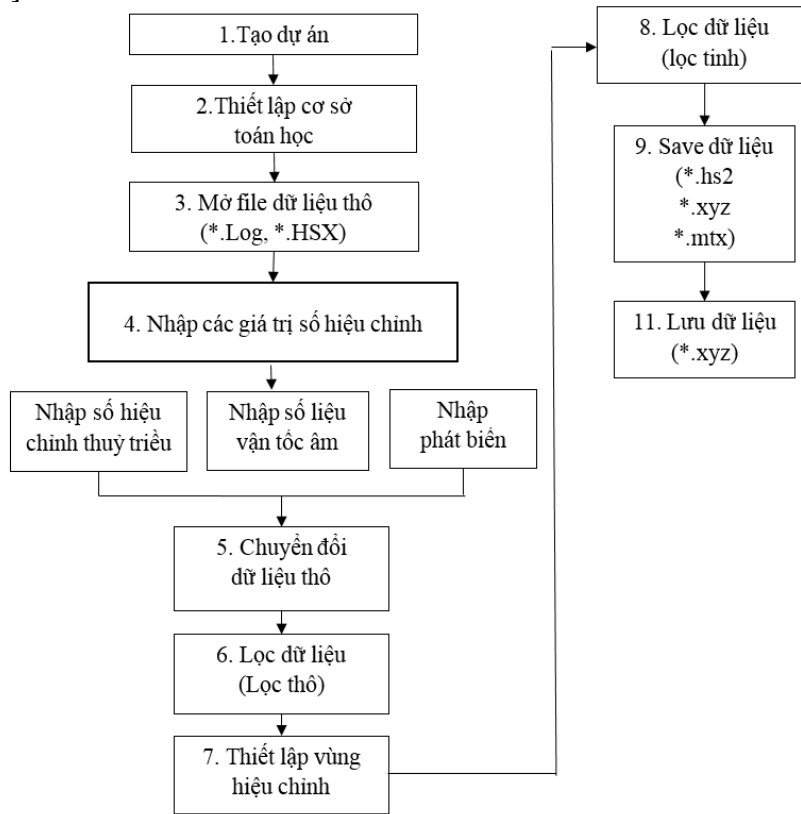
Trong đó ME_Z là sai số trung bình; n , Z_{di} , và Z_{ri} tương ứng giống như trong công thức (1).

3. Kết quả và thảo luận

Dựa vào dữ liệu thu được ngoài thực địa đã được trình bày ở trên, nhóm tác giả đã xây dựng được bộ dữ liệu thành phần tọa độ 3 chiều của các điểm đo sâu bao gồm 6429 điểm. Quy trình đo đạc thực nghiệm được thực hiện theo các bước cơ bản như sau:

- Bước 1: Chuẩn bị thiết bị đo đạc, kiểm nghiệm đánh giá thiết bị trước khi đo;
- Bước 2: Đo đạc thu thập số liệu thực nghiệm;
- Bước 3: Xử lý số liệu sau khi đo đạc.

Số liệu sau khi đo đạc được xử lý theo quy trình biểu diễn như trong hình 9 bằng phần mềm Hypack [25].

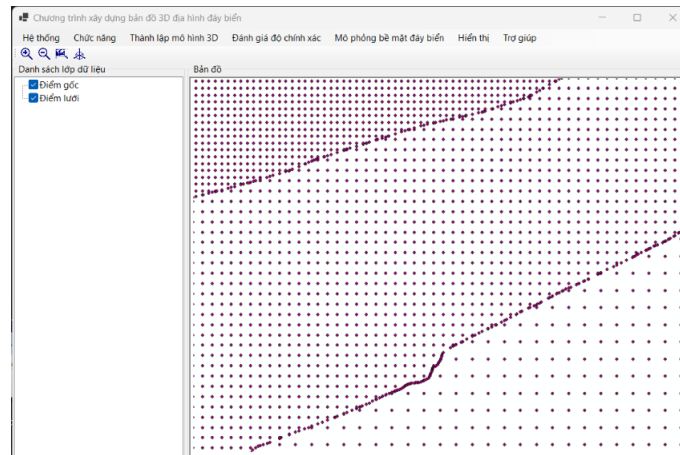


Hình 9. Xác định các thành phần tọa độ 3 chiều điểm đo sâu sử dụng phần mềm Hypack.

Dựa vào thuật toán đường cong không gian, nhóm tác giả đã xây dựng 01 phần mềm xây dựng mô hình số 3D địa hình đáy biển. Chức năng chính của phần mềm bao gồm:

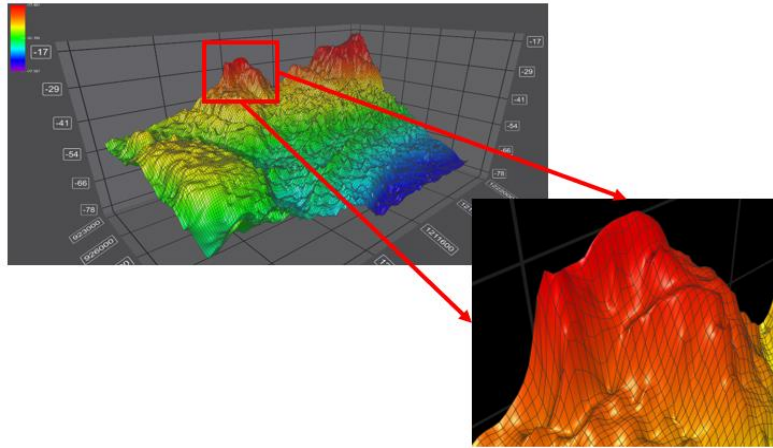
- Đọc dữ liệu gốc từ kết quả đo sâu hồi âm đa tia;
- Tạo lưới độ sâu đa độ phân giải và nội suy giá trị độ sâu theo các thuật toán IDW, theo hàm xu thế Cubic Spline;
- Thành lập mô hình số 3D địa hình đáy biển và đánh giá độ chính xác;
- Mô phỏng bề mặt đáy biển.

Giao diện của phần mềm được thiết kế đơn giản và thân thiện với người dùng được thể hiện trong hình 10.



Hình 10. Mô hình số 3D bề mặt với các tứ giác cong không gian.

Mô hình số bề mặt với các tứ giác là đường cong không gian được xây dựng bằng phần mềm thể hiện như hình 11.



Hình 11. Mô hình số 3D bề mặt với các tứ giác cong không gian.

Dựa vào phương pháp đánh giá độ chính xác mô hình đã trình bày ở trên, các tác giả đã tính toán các sai số trung phương cho các mô hình được thành lập sử dụng 714 điểm để kiểm tra và so sánh Kết quả tính toán $RMSE = \pm 0,465m$, $ME = 0,064m$ được thể hiện cụ thể như bảng 1.

Bảng 1. Đánh giá độ chính xác mô hình số vừa thành lập.

STT	X	Y	Z _{thực}	Z _{Mh}	Hiệu di	di	di ²
1	924749,50	1220085,75	18,09	18,03	-0,06	0,06	0,00
2	924722,94	1220111,38	18,09	18,03	-0,06	0,06	0,00
3	924704,38	1220084,00	18,04	18,13	0,09	0,09	0,01
4	924407,56	1220033,75	18,25	18,25	0,00	0,00	0,00
5	924395,75	1220014,63	18,29	18,25	-0,04	0,04	0,00
6	924660,69	1220040,63	18,30	18,28	-0,02	0,02	0,00
7	924655,88	1220043,13	18,30	18,28	-0,02	0,02	0,00
8	924445,38	1220051,63	18,30	18,30	0,00	0,00	0,00
9	924489,38	1220014,75	18,37	18,30	-0,07	0,07	0,01
...
708	930963,63	1219627,88	49,79	50,02	0,23	0,23	0,05
709	931037,31	1219693,00	49,75	50,06	0,31	0,31	0,10
710	931023,06	1219726,88	50,21	50,06	-0,16	0,16	0,03
711	930984,25	1219805,88	50,07	50,06	-0,01	0,01	0,00
712	931010,50	1219821,50	50,08	50,06	-0,02	0,02	0,00
713	930975,06	1219832,75	50,23	50,06	-0,17	0,17	0,03
714	930803,69	1219288,50	50,07	50,06	-0,01	0,01	0,00
Sai số trung bình ME (m)							0,064m
Sai số trung phương RMSE (m)							±0,465m

4. Kết luận

Dựa trên kết quả nghiên cứu cơ sở toán học, nhóm nghiên cứu đã đề xuất ứng dụng thuật toán Cubic Spline để xây dựng mô hình số 3D bề mặt địa hình đáy biển. Kèm theo đó, phương pháp và quy trình xây dựng mô hình số 3D bề mặt sử dụng thuật toán Cubic Spline đã được xác lập bao gồm 5 bước như đã trình bày trong mục 2.

Kết quả của nghiên cứu này đó là đã xây dựng được mô hình số 3D bề mặt cho khu vực biển Nha Trang - Khánh Hòa với độ chính xác xây dựng mô hình là $\pm 0,465m$. Độ chính xác xây dựng mô hình nêu trên hoàn toàn đáp ứng yêu cầu về độ chính xác trong xây dựng mô hình / bản đồ 3D địa hình đáy biển phục vụ ứng dụng đa mục tiêu.

Một nhược điểm của nghiên cứu này đó là chưa trích xuất được dữ liệu mô hình 3D bề mặt sang các định dạng mà các phần mềm GIS hiện đang sử dụng. Trong thời gian tới, cần

tiếp tục nghiên cứu phát triển công cụ để có thể tích hợp kết quả của nghiên cứu này với các phần mềm GIS.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: N.Đ.H.; Viết bản thảo bài báo: N.Đ.H.; Xử lý số liệu: P.N.Q.; Chỉnh sửa bài báo: N.Đ.H., P.N.Q.

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

1. Makowski, C.; Finkl, C.W. Seafloor mapping along continental shelves: Research and Techniques for Visualizing Benthic Environments. (Eds.) Coastal Research Library, **2016**, 13, pp. 293. Doi: 10.1007/978-3-319-25121-9_1.
2. Carron, M.J.; Vogt, P.R.; Jung, W.Y. A proposed international long-term project to systematically map the world's ocean floors from beach to trench: GOMaP (Global Ocean Mapping Program). *Int. Hydrographic Rev.* **2001**, 2(3), 49–55.
3. Favali, P.; Beranzoli, L. Seafloor observatory science: A review. *Annals of Geophysics*, **2006**, 49(2/3), 515–567.
4. Parente, C.; Vallario, A. Interpolation of single beam echo sounder data for 3D bathymetric model, (IJACSA). *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* **2019**, 10(10), 6–13.
5. Hao, Y.; Ren, H.; Guo, Z. 3D seabed terrain establishment based on improved moving green function spline interpolation. *Int. Conf. Inf. Sci.* **2013**, 275–279.
6. Alcaras, E.; Amoroso, P.P.; Parente, C. The influence of interpolated point location and density on 3D bathymetric models generated by Kriging methods: An Application on the Giglio Island Seabed (Italy). *Geosci.* **2022**, 12, 62. <https://doi.org/10.3390/geosciences12020062>.
7. Amante, C.J.; Eakins, B.W. Accuracy of interpolated bathymetry in digital elevation models. *J. Coastal Res.* **2016**, 76, 123–133.
8. Lemenkova, P. Seafloor mapping of the Atlantic ocean by GMT: Visualizing mid-Atlantic ridge spreading, sediment distribution and tectonic development. *Acta Geobalcanica* **2020**, 6(3), 145–157.
9. Lemenkova, P. Geophysical modelling of the middle America trend using GMT. *Geogr. Sci.* **2019**, 19(2), 73–94.
10. Lemenkova, P. Topography of the Aleutian trench south-east off Bowers Ridge, Bering Sea, in the context of the geological development of North Pacific Ocean. *Baltica* **2021**, 34(1), 27–46.
11. Lemenkova, P. Using GMT for 2D and 3D modeling of the Ryukyu trench topography, Pacific Ocean. *Miscellanea Geographica* **2021**, 25(4), 213–225.
12. Zirek, E.; Sunar, F. Change detection of seafloor topography by modelling multitemporal multibeam echosounder measurements. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* **2014**, XL-7, 221–227. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-221-2014>.
13. Naik, M.; Ranade, G.; Lohani, R.B. Evolution of sonar survey systems for sea floor studies. *Eng. Technol. J.* **2017**, 2(6), 185–195.
14. Bryson, M.; Roberson, M.J.; Pizarro.; Williams, S.B. True color correction of autonomous underwater vehicle imagery. *J. Field Rob.* **2016**, 33(6), 853–874. Doi: 10.1002/rob.21638.
15. Quadros, N.D.; Collier, P.A.; Fraser, C.S. Integration of bathymetric and topographic lidar: A preliminary investigation. *Proceeding of the International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **2008**, XXXVII. Part B8, 1299–1304.

16. Ai, B.; Tang, X.; Ji, M.; Li, Z. 3D terrain visualization system of coastal zone. Proceeding of the 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology, Chengdu, China, 2010, pp. 254–257. Doi: 10.1109/ICCSIT.2010.5563523.
17. Tomasz, N.; Åge, H.; Mark, A.S.; Thomas, D.L.; Imants, G.P. A multi-scale investigation into seafloor topography of the northern Mid-Atlantic Ridge based on geographic information system analysis. *Deep-Sea Research II* **2013**, 98, 231–243.
18. Quang, P.V.; Trang, D.C. Nghiên cứu máy đo sâu hồi âm đa tia và khả năng ứng dụng trong công tác khảo sát công trình tại Việt Nam. *Tạp chí Khoa học công nghệ xây dựng* **2014**, 3, 47–52.
19. Hải, P.M.; Yên, P.Q. Nghiên cứu ứng dụng thuật toán Stumpf và phương pháp học máy (machine learning) trong xác định độ sâu đáy biển khu vực đảo xa bờ bằng ảnh viễn thám. *Tạp chí Khoa học Đo đạc và Bản đồ* **2019**, 41, 22–29.
20. Trung, N.N.; Huong, N.T.T. Topography of the Moho and Earth Crust Structure Beneath the East Vietnam Sea from 3D Inversion of Gravity Field Data. *Acta Geophys.* **2013**, 61(2), 357–384.
21. Cương, N.V.; Trọng, N.G.; Hiệp, N.T.; Hoàn Đ.V.; Liên P.T.P. Ứng dụng công nghệ thông tin trong công tác đánh giá độ chính xác số liệu đo sâu đơn tia phục vụ thành lập bản đồ địa hình đáy biển. *Tạp chí Khoa học Đo đạc và Bản đồ* **2021**, 48, 29–34.
22. Long, K.V.; Tuấn, L.V.; Thành, H.V.; Hải, N.Đ.; Mong, Đ.V. Đặc điểm và biến đổi địa hình đáy biển khu vực đảo Trường Sa. *Tạp chí Khoa học Đo đạc và Bản đồ* **2022**, 53, 9–17.
23. William, H.P.; Saul, A.T.; William, T.V.; Brian, P. F. Numerical recipes: The art of scientific computing (3rd Edition). *Acta Appl. Mat.* **2007**, pp. 1256.
24. Kato, T.; Goda, H. Formation and maintenance processes of a stationary band-shaped heavy rainfall observed in Niigata on 4 August 1998. *J. Meteor. Soc. Japan* **2001**, 79, 899–294.
25. Trục tuyến: <https://support.hypack.com/hypack/2023/>.
26. Hải, N.Đ.; Trọng, N.G.; Trường, C.H.; Quang, P.N. Phương pháp trực quan hóa mô hình 3D địa hình đáy biển từ dữ liệu đo sâu hồi âm đa tia và dữ liệu thủy âm quét sườn. *Tạp chí Khí tượng thủy văn* **2023**, 753, 50–59.

Building a 3D underwater terrain model based on the parametric curve method

Nguyen Dinh Hai¹, Pham Ngoc Quang^{2,3*}

¹ Viet Nam's People Naval Hydrographic and Oceanographic Department;
hthhaithem@gmail.com

² Faculty of Geomatics and Land administration, Hanoi University of Mining and Geology; phamngocquang@humg.edu.vn

³ Geodesy and Environment Research Group, Hanoi University of Mining and Geology

Abstract: Seabed topography maps, nautical charts, and 3D numerical models of seabed terrain are indispensable sources of information (or tools) for marine activities. Given their advantage of providing information in a highly visual manner, 3D numerical models of seabed terrain have been prioritized for research and development globally in recent times. In Vietnam, due to limitations in accessing data, research on constructing 3D numerical models of seabed terrain remains significantly constrained. One crucial aspect in the process of building a 3D numerical model of seabed terrain is the interpolation of depth points and the creation of the 3D model surface. The quality of the 3D model constructed depends on various factors, including the method of interpolating depth points and building the surface

of the 3D model. This study proposes the use of the Cubic Spline algorithm for interpolating depth points and determining the surface of the 3D numerical model of seabed terrain. Based on the proposed algorithm and procedure, experiments were conducted to build a 3D numerical model of seabed terrain for the Nha Trang - Khanh Hoa marine area. The accuracy evaluation results indicate that the constructed model accurately determines the depth with a root mean square error of ± 0.465 meters. The accuracy of the constructed model fully meets the requirements for building a 3D numerical model of seabed terrain.

Keywords: 3D; Seabed terrain; Interpolation method; Spline.