

Công nghệ kỹ thuật ngược cho tái sản xuất chi tiết máy mòn hỏng dựa trên dữ liệu quét 3D

Using the reverse engineering technology for remanufacturing of broken mechanical part based on 3D scanning data

Hoàng Tiến Dũng, Nguyễn Việt Hùng*,
Nguyễn Văn Cảnh, Đào Ngọc Hoàn, Phạm Văn Trinh

Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

**Email: hung2009hau@gmail.com*

Mobile: 0904176105

Tóm tắt

Từ khóa:

Thiết kế ngược; Dữ liệu đám mây điểm; Chi tiết mòn hỏng; Tái thiết mô hình CAD; Đặc tính xử lý dữ liệu

Bộ phận máy hay chi tiết máy cần tiến tới tái sản xuất/ chế tạo, chúng liên quan đến các mức độ biến đổi mất kiểm soát ở các điều kiện hỏng hóc như mức độ mòn/ hỏng của cấu trúc và hình dạng phức tạp. Với sự trợ giúp của kỹ thuật ngược, các vị trí mòn/ hỏng của chi tiết máy là hoàn toàn có thể kiểm soát được chính xác và nhanh chóng. Cùng với đó, các hoạt động cần thiết để tái sản xuất là thuận lợi hơn và có thể đạt được các chi tiết sau đó với các điều kiện như chi tiết mới ban đầu. Trong bài báo này, một giải pháp dựa trên kỹ thuật ngược được đề xuất để trợ giúp cho quá trình tái sản xuất của các chi tiết mòn/ hỏng. Trước tiên, bộ dữ liệu đám mây điểm của mô hình chi tiết nhận được từ máy quét laser. Sau đó, dữ liệu đám mây điểm này được xử lý dựa trên sự kết hợp các đặc tính xử lý như lọc bỏ nhiễu, trích dẫn đặc tính và đơn giản hóa để sản sinh ra mô hình dữ liệu đám mây điểm mới tinh gọn và đáng tin cậy. Theo đó, mô hình hình học CAD 3D danh nghĩa của chi tiết được tái cấu trúc ngay sau đó. Cuối cùng, mô hình chi tiết chính xác này sẽ đáp ứng cho phần mềm CAM để thực hiện mô phỏng quá trình gia công và tạo lập chương trình gia công G-code nhằm đạt hiệu quả cho quá trình tái sản xuất. Kết quả thực nghiệm đối với sản phẩm trục vít xoắn của máy nén khí, sử dụng 93,26% dữ liệu đám mây điểm ban đầu để đạt độ chính xác tại 50 μm trong việc tái cấu trúc mô hình. Sản phẩm hoàn toàn có thể tái sản xuất với mô hình đạt được từ quá trình kỹ thuật ngược này.

Abstract

Keywords:

Reverse Engineering; Point cloud data; Broken parts; CAD model reconstruction; Data processing feature.

The worm mechanical parts and component are required to the remanufacturing system present uncontrolled variabilities in break conditions as the complex shapes and structures. Using the aid of reverse engineering (RE) technology, the worn part specially is quick and accurate accomplishment of the damaged regions. Thereby, RE facilitates remanufacturing operations to generate the parts with the like-new conditions. In this work, we propose a reverse engineering-based solution to reproduce the worm/broken mechanical part. Firstly, a model of point cloud data of real objects acquires by using the laser scanner. Secondly, the point cloud data would be processed by the combination of features as noise filter, feature extraction and simplification, which aim at reconstruction of nominal 3D CAD geometric model to improve the reliability. Finally, this model would serve the CAM software with input to generate the G-code program of machining process which is efficient for re-manufacturing object. Experimental results based on worm screw shaft of rotary-screw compressor demonstrate for using 93.26%-point cloud data effective to obtain the geometric accuracy of 50 (μm) of the model reconstruction. The product exactly is re-manufacturable based on 3D CAD model of reverse engineering.

Ngày nhận bài: 18/8/2018

Ngày nhận bài sửa: 14/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

1. MỞ ĐẦU

Tái sản xuất các chi tiết máy hay bộ phận cơ khí quan trọng không mong muốn dẫn tới mòn/ hỏng hay có nhu cầu cho sản phẩm dự phòng đã để lộ ra thực tế đầy hứa hẹn để giảm tác động môi trường và giảm tài chính tiêu dùng bằng cách kéo dài tuổi thọ của chúng. Tuy nhiên, các chi tiết máy hay bộ phận cơ khí này phụ thuộc mức độ biến đổi mất kiểm soát trong các điều kiện hỏng hóc như mức độ mòn/ hỏng về biên dạng, kích thước và cấu trúc. Việc sửa chữa thủ công để phục hồi lại hình dạng gốc là đòi hỏi lớn về thời gian và công sức mà chất lượng các sản phẩm không hoàn toàn được như ban đầu. Quá trình phục hồi tự động cho các chi tiết này là có ý nghĩa quan trọng để khắc phục các vấn đề khó khăn phát sinh từ các biến đổi hình học của từng phần chi tiết, và để nhận được hiệu quả cao khi chúng đòi hỏi chất lượng nghiêm ngặt.

Kỹ thuật ngược (RE) là một nhánh rẽ quan trọng trong quá trình phát triển công nghiệp [1]. Kỹ thuật này như một kỹ thuật tự động được sử dụng rộng rãi trong sản xuất đối với thiết kế chi tiết hay sản phẩm mới, và trong việc mô hình hóa bề mặt cho việc sửa chữa các sản phẩm cơ khí [2]. Với sự trợ giúp của kỹ thuật này, các bề mặt chi tiết tại vị trí mòn/ hỏng là có thể đạt được nhanh chóng và chính xác và trợ giúp cho các hoạt động sau đó để có chi tiết sau đó với điều kiện làm việc giống như mới. RE có thể được chia thành ba tính chất bao gồm sự đảo nghịch về vật lý, sự đảo nghịch về phần mềm và sự đảo nghịch về hình ảnh. Hiện tại, nhiều nghiên cứu về công nghệ kỹ thuật ngược tập trung vào hình dáng hình học, tái cấu trúc mô hình CAD (Computer Aided Design) để sửa chữa sản phẩm cơ khí.

Phương pháp RE được thực hiện từ sản phẩm vật lý hiện hữu đến bản vẽ và cuối cùng là các chi tiết được tái sản xuất, phương pháp này khác với phương pháp thuận là từ các bản vẽ tới sản xuất sản phẩm. Thiết bị đo kiểm số 3D được sử dụng để đo kiểm tập hợp dữ liệu đám mây điểm của mô hình. Dữ liệu này được sử dụng sau đó để tái cấu trúc mô hình CAD bởi phương pháp mô hình hóa hình học 3D. Bằng phương pháp này, các vị trí hỏng hóc của chi tiết hay bộ phận cơ khí có thể được nhận ra và được xác định vị trí. Nòng cốt của công nghệ RE là thiết bị đo kiểm và phần mềm xử lý. Thiết bị đo kiểm như máy quét PIX 30 DOT, ATOS và MCAX đã và đang được sử dụng rộng rãi. Trong công việc này, chúng tôi đã sử dụng máy quét MCAX [3] để tập hợp dữ liệu đám mây điểm. Tiêu biểu cho phần mềm ứng dụng trong công nghệ RE là Geomagic Studio, Siemen NX, Pro/E và mô đun hàm đám mây điểm. Các phần mềm này được sử dụng để xử lý dữ liệu đám mây điểm và tái cấu trúc mô hình hình học của sản phẩm/chi tiết máy. Chúng có thể được lựa chọn liên quan đến nhu cầu thực tế, mức độ phức tạp và độ chính xác của đối tượng vật lý. Geomagic Studio là phần mềm được sử dụng rộng rãi để xử lý dữ liệu và điều chỉnh các mô hình. Geomagic Qualify là phần mềm được sử dụng cho việc kiểm tra đánh giá sự tái cấu trúc mô hình [4, 5].

Dựa vào công nghệ kỹ thuật ngược RE, chúng tôi đề xuất sử dụng để tái sản xuất sản phẩm chi tiết máy bị mòn hỏng với việc tái cấu trúc mô hình dựa trên dữ liệu đám mây điểm giành được từ máy quét. Công việc này phục vụ quá trình giám sát, bảo dưỡng, chuẩn đoán lỗi nhằm kéo dài tuổi thọ và mức độ an toàn của hệ thống cơ khí.

Phần còn lại của bài báo được thiết lập như sau: Mục 2 thể hiện lý thuyết nền tảng quan trọng trong công nghệ kỹ thuật ngược. Mục 3 thể hiện kết quả thực nghiệm để tái tạo chi tiết mòn hỏng trong cơ khí. Trong đó, chúng tôi đã đề xuất sự kết hợp các đặc tính trong việc xử lý dữ liệu đám mây điểm ban đầu để có thể đạt được cuối cùng với sản phẩm cần tái sản xuất. Mục 4 tổng kết các kết luận của bài báo, sau cùng là danh mục tài liệu tham khảo và lời cảm ơn.

2. KỸ THUẬT NGƯỢC: LÝ THUYẾT NỀN TẢNG

Tại phần này, các tác giả sẽ giới thiệu qui trình công nghệ tổng quan trong thiết kế ngược, một mô hình được thể hiện chi tiết. Cùng với đó, các đặc tính quan trọng sử dụng trong kỹ thuật ngược sẽ được thể hiện.

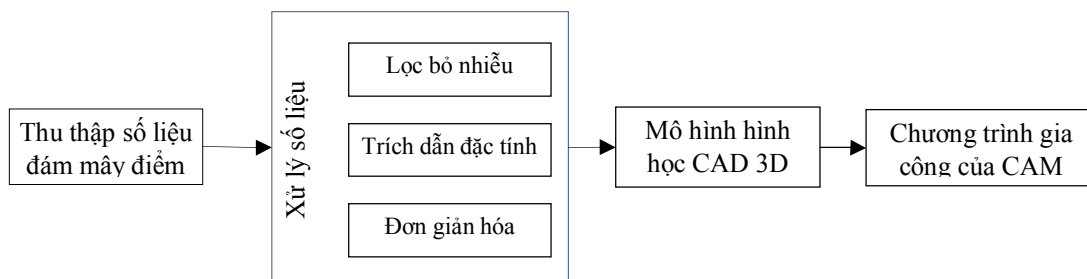
2.1. Kỹ thuật ngược (Reverse Engineering RE)

Kỹ thuật ngược (RE) đã được định nghĩa ban đầu như quá trình phát triển một bộ các đặc tính cho hệ thống thiết bị bằng việc nghiên cứu vật mẫu theo trình tự của hệ thống [6]. Các tác giả trong tài liệu [7] đã định nghĩa kỹ thuật ngược (RE) như quá trình phân tích một hệ thống các đối tượng nghiên cứu để nhận ra các thành phần của hệ thống và mối liên quan của chúng. Đồng thời, RE cũng nhằm vào sự tái thiết kế các thành phần của hệ thống được thể hiện ở hình thái khác hay ở phương diện cao hơn.

Trong thiết kế cơ khí, kỹ thuật ngược (RE) có thể được định nghĩa: về mặt nào đó, quá trình tiếp nhận và tái thiết kế một sản phẩm là được dự báo, được theo dõi, được tháo dỡ, được phân tích, được kiểm tra, được thẩm định và được đưa ra thành tài liệu trong các điều kiện về chức năng, hình dáng, cơ sở vật lý, chế tạo và lắp ráp của sản phẩm [8]. Kỹ thuật ngược được cân nhắc như một phương pháp để làm sáng tỏ quá trình như thế nào đó cho sản xuất sản phẩm. Quá trình sao chép một chi tiết để nhận được một mô hình tương đương hay một sản phẩm ưu thế hơn. Để thực sự nâng cao khả năng hoạt động của sản phẩm, cần nắm bắt và áp dụng các thông tin ẩn chứa trong sản phẩm gốc cho việc thiết kế mới. Trong đó, mô hình hóa hình học ngược được nghiên cứu chuyên sâu về hình dáng hình học của sản phẩm.

2.2. Quy trình công nghệ tổng quan trong thiết kế ngược

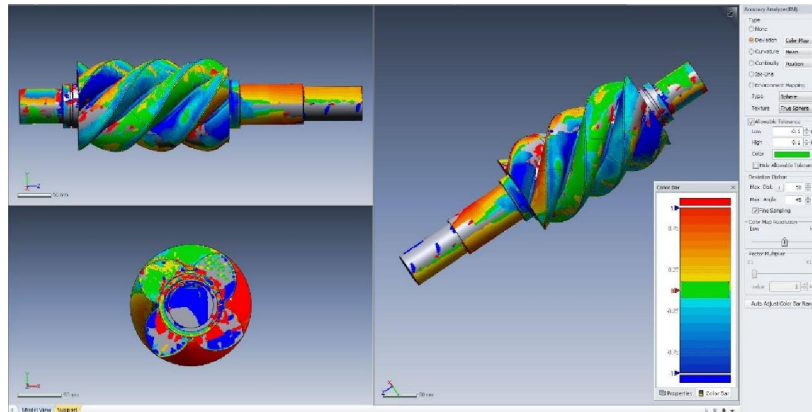
Công nghệ RE được thể hiện tổng quan trong **Hình 1**. Hình vẽ thể hiện bốn bước quan trọng của công nghệ RE trong thiết kế chi tiết cơ khí như sau: (1) thu thập dữ liệu đám mây điểm bằng việc sử dụng máy quét laser; (2) Xử lý dữ liệu đám mây điểm dựa trên sự kết hợp các đặc tính của lọc bỏ nhiễu, đơn giản hóa dữ liệu, trích dẫn đặc tính nhằm mục đích tái cấu trúc mô hình đối tượng; (3) Mô hình hình học CAD 3D được tái cấu trúc dựa trên sự tinh gọn và hiệu quả của dữ liệu đám mây điểm đã xử lý. Từ đó có thể trích xuất dữ liệu CAD cho quá trình thiết kế chi tiết; (4) Dựa vào mô hình hình học CAD thu được, chương trình gia công các bề mặt của sản phẩm được tạo ra bởi quá trình sản xuất có sự trợ giúp của máy tính (Computer Aided Manufacturing CAM).



Hình 1. Khung cấu trúc đề xuất của công nghệ RE

Đặc biệt, mô hình hình học CAD có thể được đánh giá độ chính xác dựa trên dữ liệu tham chiếu thu được từ đầu đo chạm (Touch Probe). Đầu đo này như một mô đun được trang bị kèm

theo thiết bị quét laser. Hơn nữa, công nghệ kỹ thuật ngược này sẽ đánh giá độ tin cậy về mức độ phân tán của đám mây điểm ban đầu so với mô hình hình học CAD đạt được như một mô hình thực nghiệm thể hiện trên **Hình 2**.

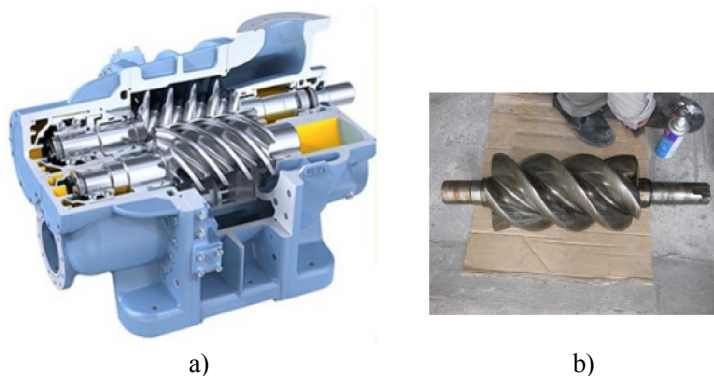


Hình 2. Mức độ phân tán của đám mây điểm ban đầu so với mô hình CAD dựng được

3. THU THẬP DỮ LIỆU ĐÁM MÂY ĐIỂM

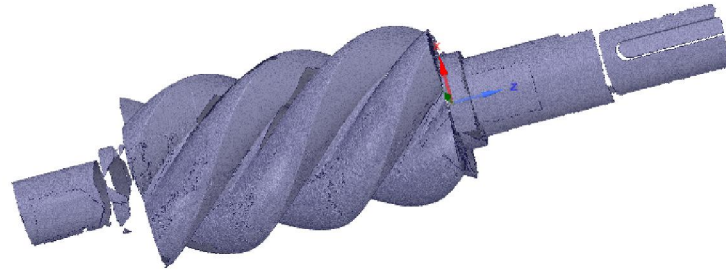
Bộ phận hay chi tiết máy quan trọng trên thiết bị cơ khí thường có nhu cầu tái sản xuất (sản xuất lại) phục vụ sửa chữa hay cho dự phòng nhằm đạt hiệu suất sử dụng và kéo dài tuổi thọ của thiết bị. Trục vít xoắn là chi tiết đóng vai trò cốt lõi của máy nén khí trục vít như chỉ ra trong **Hình 3**. Theo thời gian, các chi tiết này thường bị mòn/ hỏng và đó là nguyên nhân dẫn tới giảm hiệu suất làm việc của máy như giảm áp suất khí, tăng rung động và có thể dẫn tới phá hủy các hệ thống thiết bị liên quan. Trong quá trình giám sát, bảo trì, sửa chữa máy, chi tiết này có thể cần tới việc tái sản xuất. Dựa vào kỹ thuật ngược, chúng tôi đã tái cấu trúc mô hình CAD cho chi tiết, đây cũng là chi tiết được sử dụng thực nghiệm cho tái thiết kế và trong bài báo này.

Sử dụng thiết bị quét MCAX với đầu quét laser không chạm, dữ liệu đám mây điểm của chi tiết đo kiểm đã thu được với số lượng rất lớn các điểm như thể hiện **Hình 4**. Các nhân tố như ánh sáng, tác động môi trường và các điều kiện hạn chế khi đo kiểm sẽ ảnh hưởng đến chất lượng dữ liệu đám mây điểm. Dữ liệu rời rạc không rõ ràng có thể làm mờ nhạt các đặc tính hình dạng chi tiết, thể hiện không rõ ràng. Hơn nữa, trong quá trình quét dữ liệu, do trở ngại của ánh sáng, rung lắc của đầu quét và một vài chất bẩn vô ý trên bề mặt chi tiết sẽ mang lại các điểm hỗn tạp và nhiễu. Xử lý dữ liệu là bước cần thiết để cải thiện chất lượng dữ liệu.



Hình 3. Đối tượng thực nghiệm

a) Cấu trúc máy nén khí trục vít. b) Trục vít xoắn bị mòn hỏng



Hình 4. Mô hình đám mây điểm nhận được từ phương pháp quét laser

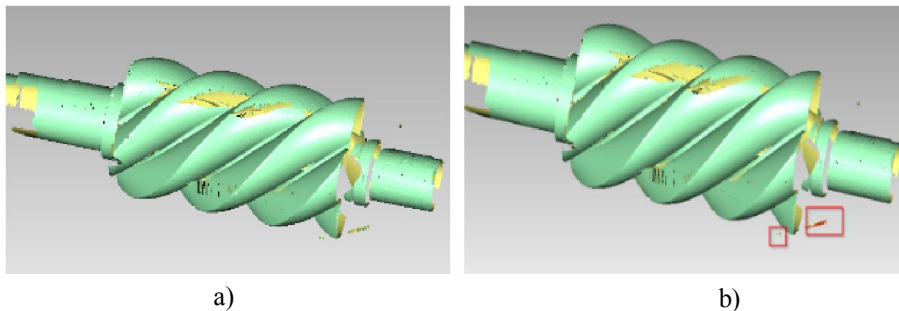
4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Tái cấu trúc mô hình CAD là cần thiết cho chi tiết máy hay bộ phận cơ khí mòn/ hỏng, mô hình này sẽ được sử dụng sau đó cho quá trình tái sản xuất. Dựa trên công nghệ kỹ thuật ngược, một chi tiết máy quan trọng trong thiết bị cơ khí được ứng dụng thực tế.

4.1. Đề xuất sự kết hợp các đặc tính cho xử lý dữ liệu đám mây điểm

Đặc tính lọc bỏ dữ liệu nhiễu/ dư thừa

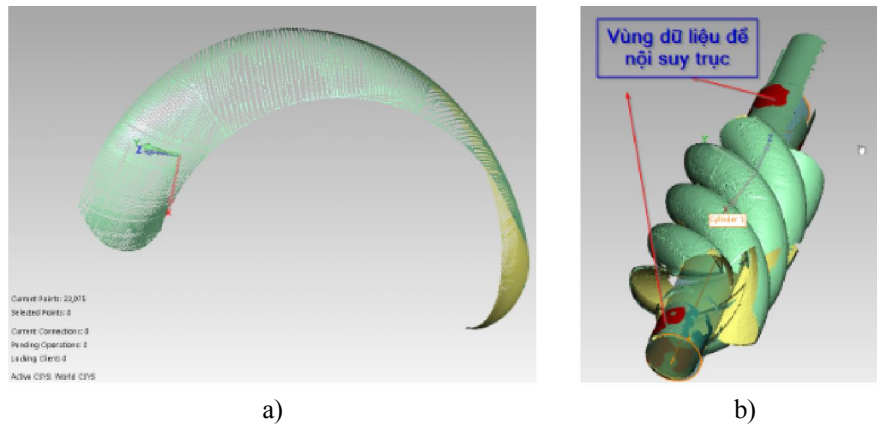
Các điểm nhiễu có thể được tạo ra bởi sự rung động hay các vấn đề ảnh hưởng khác khi quét tạo dữ liệu. Các điểm này là không cần thiết và sẽ bị xóa bỏ. Đặc tính lọc bỏ dữ liệu có tác dụng mạnh mẽ để loại bỏ dữ liệu nhiễu/ dư thừa trong dữ liệu gốc. Đặc tính này sẽ nén chặt các điểm rời rạc ban đầu tạo thành đám mây điểm mới có mật độ dày, trơn mịn hơn. Mô hình thực nghiệm với trục xoắn vít thể hiện trong **Hình 5**. Hai dữ liệu đám mây điểm trước và sau khi xử lý bởi đặc tính lọc tương ứng thể hiện ở Hình 5 (a) và Hình 5 (b).



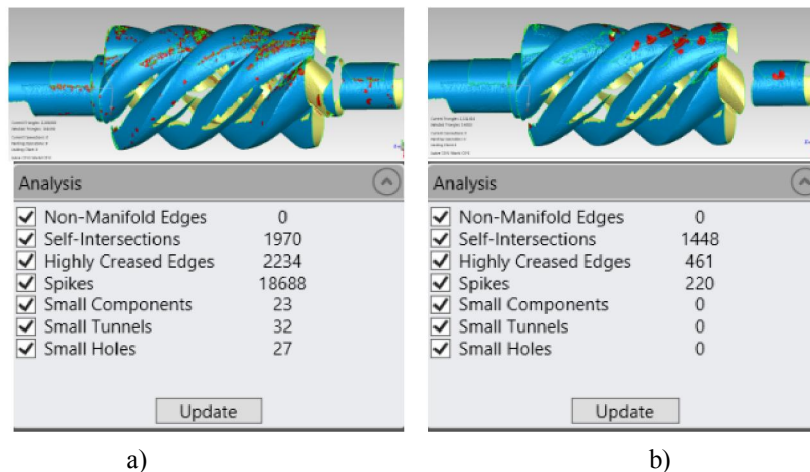
Hình 5. Sự so sánh các đám mây điểm trước và sau khi lọc bỏ nhiễu

Trích dẫn đặc tính

Đây là đặc tính quan trọng sau khi loại bỏ các dữ liệu nhiễu đã tồn tại trong quá trình thu thập dữ liệu đám mây điểm. Các đối tượng đặc tính được lựa chọn trích dẫn có thể là đối tượng hình học 2D hoặc 3D chúng nắm giữ vai trò kỹ thuật quan trọng của chi tiết hay bộ phận máy mà vai trò người thực hiện công nghệ kỹ thuật cần nắm rõ. Trên đối tượng thực nghiệm, hai đặc tính về biên dạng mặt xoắn vít và đường tròn cổ trục là quan trọng cho hoạt động có hiệu quả của thiết bị máy nén khí. Vì vậy, chúng tôi đã lựa chọn chính xác hai đặc tính này từ dữ liệu đám mây điểm ban đầu để tái tạo mô hình. **Hình 6** thể hiện sự trích dẫn hai đặc tính tương ứng với biên dạng bề mặt xoắn vít và đường tròn cổ trục dựa trên mô hình đám mây điểm ban đầu của chi tiết.



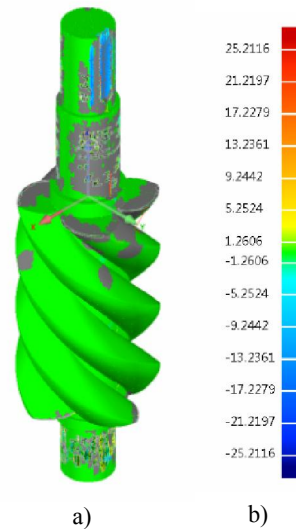
Hình 6. Lựa chọn đặc tính cho tái thiết mô hình chi tiết
a) đặc tính biên dạng bề mặt xoắn vít; b) đặc tính đường tròn tái thiết cổ trục



Hình 7. Sơ đồ tương phản trước và sau khi xử lý trơn mịn dữ liệu
a) Trước khi đơn giản hóa; b) Sau khi đơn giản hóa

Đặc tính đơn giản hóa

Một bề mặt có thể được quét lặp lại nhiều hơn một lần cùng với sai số quét sẽ sinh ra dữ liệu dư thừa, trùng lặp và sự đồ sộ của dữ liệu thu được ban đầu. Đặc tính đơn giản hóa nhằm loại bỏ các dữ liệu dư thừa không cần thiết để sản sinh dữ liệu đám mây điểm mới tinh gọn hơn. Mục đích hướng tới là việc thiêu đốt về thời gian tính toán, xử lý là nhanh hơn. Và sự xâm chiếm bộ nhớ cho dữ liệu là gọn hơn để có thể thực hiện chính xác trong việc tái cấu trúc mô hình học sản phẩm. Đặc biệt, đặc tính đơn giản hóa các tam giác lưới được sử dụng để tạo ra bề mặt xoắn vít của mô hình tron nhãn. Ở đó, số tam giác được tính toán giảm tới 20% để đạt được độ chính xác bề mặt 50 (μm). Và sai lệch trung bình của dữ liệu nhận được chỉ là tỷ lệ rất nhỏ 83‰ (mm) với mức độ tin cậy cao. **Hình 7** thể hiện kết quả trước và sau khi đơn giản hóa dữ liệu đám mây điểm của mô hình sản phẩm.



Hình 8. Biểu màu phân tích độ chính xác của mô hình CAD xây dựng với dữ liệu đám mây điểm ban đầu (μm)
a) Mô hình CAD xây dựng và dữ liệu đám mây điểm; b) Thanh màu (Colorbar)

4.2. Phân tích kết quả thực nghiệm

Sau khi xử lý dữ liệu đám mây điểm bởi sự kết hợp các đặc tính như đã đề cập ở trên, dữ liệu chi tiết được phân tích phù hợp cho sự kết nối của các đường cong và các bề mặt. Sự thẩm tra về sai lệch cơ bản ở trong một vùng lý tưởng bằng cách chỉ ra sự nhận biết biểu đồ sắc phổ của các sai lệch như được thể hiện trên **Hình 8**. Chi tiết mòn/ hỏng bằng phương pháp này sau đó được tái cấu trúc với mô hình hình học CAD. Trong đó, **Hình 8** thể hiện độ lệch của đám mây điểm với dữ liệu CAD được xây dựng, với sai số nằm trong khoảng $[-25,2116; +25,2116]$ μm . Sai số tại từng vùng được thể hiện tương ứng với màu sắc trên chi tiết và trị số tương ứng trên thanh màu (colorbar). Quan sát phổ màu ta thấy, dữ liệu đám mây điểm hầu hết đều thuộc vùng $[-1,2606; +1,2606]$ (μm) đảm bảo độ chính xác của sản phẩm. Điều này thể hiện độ chính xác của phương pháp nội suy bởi việc trích dẫn đặc tính dựa trên số lượng hữu hạn các điểm thuộc bề mặt đó.

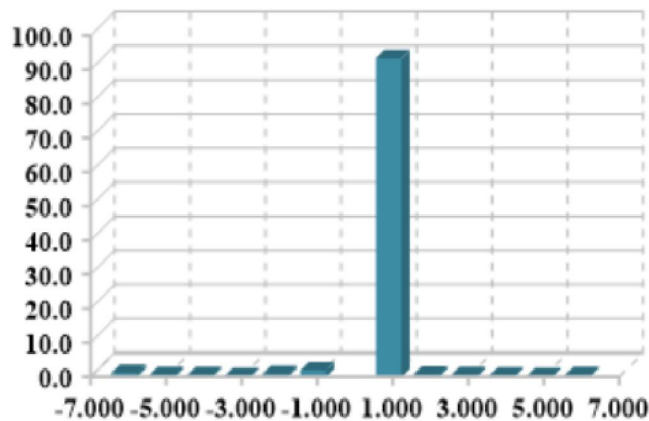
Bảng 1. Độ lệch chuẩn của mô hình đạt được với mô hình dữ liệu ban đầu

Phân bố sai lệch	Số điểm	Sai số	Tỉ lệ điểm %
-6*Std.Dev.	358	$[-25,2116; -21,2197]$	1,1370
-5*Std.Dev.	128	$[-25,2197; -17,2279]$	0,4065
-4*Std.Dev.	129	$[-17,2279; -13,2361]$	0,4097
-3*Std.Dev.	58	$[-13,2361; -9,2442]$	0,1842
-2*Std.Dev.	267	$[-9,2442; -5,2524]$	0,8480
-1*Std.Dev.	580	$[-5,2524; -1,2606]$	1,8420
1*Std.Dev.	29365	$[+1,2606; +5,2524]$	93,2607
2*Std.Dev.	214	$[+5,2524; +9,2442]$	0,6796
3*Std.Dev.	152	$[+9,2442; +13,2361]$	0,4827
4*Std.Dev.	80	$[+13,2461; +17,2279]$	0,2541
5*Std.Dev.	29	$[+17,2270; +21,2197]$	0,0921
6*Std.Dev.	127	$[+21,2197; +25,12116]$	0,4033

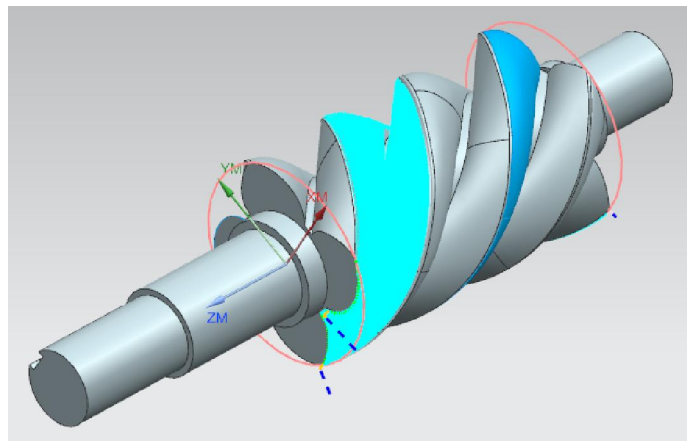
Bảng 1 thể hiện kết quả phân tích đánh giá độ lệch chuẩn của mô hình CAD 3D đạt được với mô hình dữ liệu đám mây điểm ban đầu. Kết quả trong bảng chỉ ra các giá trị số học về mức

độ phân bố sai lệch chuẩn ở mức độ quá nhỏ không được thể hiện rõ bằng phổ màu. Bổ xung thêm tỷ lệ phần trăm số điểm sai lệch với mức độ lệch chuẩn không mong muốn, tương ứng. Đặc biệt, Bảng dữ liệu chỉ ra 93,2607 % các điểm nhận được tập trung tại độ lệch chuẩn 1 điều này thể hiện mức độ chính xác của mô hình đạt được dựa trên dữ liệu thu thập ban đầu. Trái ngược lại, chỉ với 0,09% các dữ liệu tập trung ở độ lệch chuẩn 5. Để có thể quan sát rõ về vấn đề này, biểu đồ thể hiện phần trăm sai lệch đã được tạo ra như trong **Hình 9**.

Hơn nữa, để tiến xa hơn của quá trình tái sản xuất chi tiết này, chúng tôi đã thực hiện mô phỏng quá trình gia công bề mặt xoắn quan trọng của chi tiết bằng dao phay ngón cầu bằng phương pháp gia công điều khiển 5D. Quá trình mô phỏng gia công sử dụng phần mềm chuyên nghiệp Siemens NX 12.0 [9], các đường gia công chạy dao được thể hiện trên **Hình 10**. Hình vẽ thể hiện bề mặt gia công hoàn toàn có thể đạt được độ chính xác bề mặt của 0,008 (mm) tại bề mặt xoắn và 0,01(mm) tại bề mặt đáy rãnh xoắn.



Hình 9. Tỷ lệ sử dụng đám mây điểm



Hình 10. Đường chạy dao gia công mặt xoắn vít của chi tiết

5. KẾT LUẬN

Dựa vào kỹ thuật ngược, bài báo đã thể hiện một phương pháp tái cấu trúc mô hình hình học CAD 3D cho chi tiết máy bị mòn/ hỏng vớ nhu cầu tái sản xuất. Từ dữ liệu đám mây điểm thu nhận được bởi phương pháp quét la-de từ máy quét 3D, đề xuất sự kết hợp của các đặc tính lọc

bỏ dữ liệu nhiễu, trích dẫn đặc tính và đơn giản hóa để xử lý dữ liệu đạt được mô hình hình học với 93,2607% các điểm chính xác đã sử dụng trong tái tạo mô hình. Hơn nữa, chất lượng bề mặt gia công đạt được là 0,008 (mm) tại bề mặt xoắn quan trọng của chi tiết bởi chương trình mô phỏng gia công điều khiển 5D. Vấn đề này hoàn toàn thực hiện được cho tái sản xuất chi tiết trục vít máy nén khí trong thực tế. Sự thành công đối với chi tiết máy bị mòn/ hỏng có nhu cầu tái sản xuất này đã mở ra xu hướng giảm thiểu kinh tế trong công nghiệp bằng việc tái sử dụng thiết bị và hướng phát triển về thiết kế ngược - tạo mẫu nhanh trong tương lai.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ về thiết bị, tài liệu, phần mềm bản quyền Geomagic Control 2014 của Khoa Cơ khí, Đại học Công nghiệp Hà Nội và sự hỗ trợ về tài liệu của công ty 3D Systems trong quá trình thực hiện bài báo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. D. Alazard, *Reverse Engineering in Control*. Willey, 2013.
- [2]. T. N. Tú, "Nghiên cứu công nghệ thiết kế ngược," Luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Giao thông vận tải, Việt Nam, 2015.
- [3]. N. MCAx. *Nikon Metrology MCAx Arm*.
- [4]. *Geomagic studio*: <http://www.geomagic.com> 2013.
- [5]. "Geomagic qualify," ed: <http://www.geomagic.com> 2013.
- [6]. M. G. Rekoff, "On reverse engineering," *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, pp. 244-252, 1985.
- [7]. E. J. Chikofsky and J. H. Cross, "Reverse engineering and design recovery: A taxonomy," *IEEE software*, vol. 7, pp. 13-17, 1990.
- [8]. K. N. Otto and K. L. Wood, "Product evolution: a reverse engineering and redesign methodology," *Research in Engineering Design*, vol. 10, pp. 226-243, 1998.
- [9]. "Siemens NX CAM use guide."