

**MINISTRY OF EDUCATION AND TRAINING
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND EDUCATION
HO CHI MINH CITY**

NGUYEN THI BICH LIEU

**DEVELOPMENT OF ISOGOMETRIC FINITE ELEMENT
METHODS TO ANALYZE AND CONTROL THE RESPONSES
OF THE LAMINATED PLATE STRUCTURES**

**Ph.D. THESIS
MAJOR: ENGINEERING MECHANICS**

Ho Chi Minh City, December 2018

THE WORK IS COMPLETED AT
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND EDUCATION
HO CHI MINH CITY

Supervisor 1: Assoc. Prof. Dr. NGUYEN XUAN HUNG

Supervisor 2: Assoc. Prof. Dr. DANG THIEN NGON

PhD thesis is protected in front of
EXAMINATION COMMITTEE FOR PROTECTION OF DOCTORAL THESIS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND EDUCATION,
Date month year

ORIGINALITY STATEMENT

I, Nguyen Thi Bich Lieu, hereby assure that this dissertation is my own work, done under the guidance of Assoc. Prof. Dr. Nguyen Xuan Hung and Assoc. Prof. Dr. Dang Thien Ngon with the best of my knowledge.

The data and results stated in the dissertation are honest and were not been published by any works.

Ho Chi Minh City, December 2018

Nguyen Thi Bich Lieu

ABSTRACT

Isogeometric analysis was introduced in 2005 by Hughes et al. as a breakthrough in numerical simulation. The main advantage of the IGA is to use the same basis function to describe the geometry and to approximate the problem unknowns. It integrates Computer Aided Design (CAD) and Computer Aided Engineering (CAE) and so far the effectively numerical tool for the analysis of a variety of practical problems. The computational cost is decreased significantly as the meshes are generated within the CAD. IGA gives the results with higher accuracy because of the smoothness and the higher-order continuity between elements. For the last decade of development, isogeometric analysis has surpassed the standard finite elements in terms of effectiveness and reliability for various problems, especially for the ones with complex geometry.

Owing to its important role in many engineering structures and modern industries, laminated plate structures are widely used in a diverse array of structures in many areas such as aviation, shipbuilding, civil engineering, etc. Laminated plates have excellent mechanical properties, including high strength to weight and stiffness to weight ratios, wear resistance, light weight and so on. Besides possessing the superior material properties, the laminated composites also supply the advantageous design through the arrangement of the stacking sequence and layer thickness to obtain the desired characteristics, that's why they have received considerable attention of many researchers worldwide.

In this dissertation, an isogeometric finite element formulation is developed based on Bézier extraction to solve various plate problems, using a seven-dof higher-order shear deformation theory for both analysis and control the responses of plate structures. One key point in this dissertation is using Bézier extraction. In the conventional isogeometric analysis, the B-spline or Non-uniform Rational B-spline (NURBS) basis functions span over the entire domain of structures not just a local domain as Lagrangian shape functions in FEM. The global structure induces the

complex implementation in a traditional finite element context. In addition, in order to compute the shape functions, the Gaussian integration points force to transform to parametric space. By choosing Bernstein polynomials as the basis functions, IGA will be performed easily similar to the way of implementation in FE framework. The B-spline/NURBS basis can be rewritten in form of the combination of Bernstein polynomials and Bézier extraction operator. That is called Bézier extraction for B-spline/NURBS/T-spline.

Although IGA is suitable for the problems which have the higher-order continuity, we use a higher-order shear deformation theory with C^0 -continuity, 7 dofs, for unification of all chapters. The explanation is that in some complex geometry with symmetric boundary conditions, it is often difficult to enforce boundary conditions for slope components, rotation free technique, due to the unification of the approximate variables.

Furthermore, we investigate both linear and nonlinear responses for four material models including laminated composite plates, piezoelectric laminated composite plates, piezoelectric functionally graded porous plates with graphene platelets reinforcement and functionally graded piezoelectric material porous plates. The control algorithms based on the constant displacement and velocity feedbacks are applied to control linear and geometrically nonlinear static and dynamic responses of the plate, where the effect of the structural damping is considered, based on a closed-loop control with piezoelectric sensors and actuators. The predictions of the proposed approach agree well with analytical solutions and several other available approaches. Through the analysis, numerical results indicated that the proposed method achieves high reliability as compared with other published solutions. Besides, some numerical solutions for PFGPM plates and FG porous reinforced by GPLs may be considered as reference solutions for future work because there have not yet been analytical solutions so far.

TÓM TẮT

Phân tích đẳng hình học (IGA) được giới thiệu năm 2005 bởi Hughes và các cộng sự như là một sự đột phá trong tính toán mô phỏng số. Ưu điểm chính của IGA là sử dụng cùng một hàm dạng cơ sở để mô tả cho cả hình học và xấp xỉ nghiệm số. Nó tích hợp việc thiết kế dựa trên máy tính cũng như công nghệ liên quan đến việc sử dụng hệ thống máy tính để phân tích đối tượng hình học CAD (CAE) và những công cụ số hiệu quả khác để phân tích nhiều lớp bài toán kỹ thuật khác nhau. Chi phí tính toán giảm đáng kể vì hình học chính xác được tạo ra trong CAD, sau đó đưa vào tính toán mà không bị sai số hình học. Hơn nữa, IGA cho kết quả với độ chính xác cao hơn vì tính trơn và tính liên tục bậc cao hơn giữa các phần tử. Trong một thập kỷ phát triển gần đây, phân tích đẳng hình học đã vượt qua phân tích phần tử hữu hạn (FEM) về tính hiệu quả và độ tin cậy đối với các bài toán khác nhau, đặc biệt đối với các bài toán có hình học phức tạp.

Bởi vì đóng vai trò quan trọng trong nhiều kết cấu kỹ thuật và công nghiệp hiện đại, kết cấu tấm nhiều lớp được sử dụng rộng rãi trong nhiều mảng kỹ thuật khác nhau chẳng hạn như hàng không, đóng tàu, kỹ thuật dân dụng, vv. Kết cấu tấm nhiều lớp có các tính chất cơ học tuyệt vời, bao gồm độ bền và độ cứng cao, khả năng chống mài mòn, trọng lượng nhẹ và nhiều đặc tính khác. Bên cạnh việc sở hữu các đặc tính vật liệu ưu việt, vật liệu tổng hợp nhiều lớp còn cung cấp thiết kế thuận lợi thông qua việc sắp xếp trình tự xếp chồng và độ dày các lớp để có được các đặc tính mong muốn, đó là lý do tại sao chúng nhận được sự quan tâm nghiên cứu đáng kể của nhiều nhà nghiên cứu trên toàn thế giới.

Trong luận án này, một công thức phần tử hữu hạn đẳng hình học được phát triển dựa trên trích xuất Bézier để giải quyết các bài toán tấm khác nhau, sử dụng lý thuyết biến dạng cắt bậc cao 7 bậc tự do cho cả phân tích và điều khiển đáp ứng của các cấu trúc tấm. Một điểm mới trong luận án này là sử dụng trích xuất Bézier. Trong phân tích đẳng hình học thông thường, các hàm cơ sở B-spline hoặc hàm NURBS trải rộng trên toàn bộ miền của các cấu trúc chứ không chỉ là một miền cục bộ như các

hàm hình dạng Lagrangian trong FEM. Việc hàm dạng phân bố toàn cục như vậy gây ra việc thực hiện tính toán phức tạp. Ngoài ra, để tính toán các hàm hình dạng, các điểm tích phân Gauss buộc phải chuyển đổi sang không gian tham số. Bằng cách chọn đa thức Bernstein làm hàm cơ sở, IGA sẽ được thực hiện dễ dàng tương tự như cách triển khai trong khung phần tử hữu hạn. Các hàm cơ sở B-spline / NURBS có thể được viết lại dưới dạng kết hợp các đa thức Bernstein và toán tử trích xuất Bézier. Đó được gọi là trích xuất Bézier cho B-spline / NURBS / T-spline.

Mặc dù IGA phù hợp với các bài toán có tính liên tục bậc cao, chúng tôi sử dụng lý thuyết biến dạng cắt bậc cao với liên tục C^0 , 7 bậc tự do, để thống nhất cho tất cả các chương. Để có sự thống nhất của các biến xấp xỉ, trong một số hình học phức tạp với các điều kiện biên đối xứng, thường khó áp điều kiện biên cho các thành phần đạo hàm nên trong luận văn này chúng tôi sử dụng IGA dựa trên trích xuất Bézier với 7 bậc tự do cho mỗi nút.

Hơn nữa, chúng tôi nghiên cứu cả đáp ứng tuyến tính và phi tuyến cho bốn loại vật liệu bao gồm tấm composite nhiều lớp, tấm composite nhiều lớp có lớp áp điện, tấm vật liệu chức năng dán lớp áp điện có lỗ rỗng được gia cường bằng các tấm graphene và tấm vật liệu áp điện chức năng có lỗ rỗng. Các thuật toán điều khiển cái dựa trên các tín hiệu phản hồi chuyển vị và vận tốc không đổi được áp dụng để điều khiển đáp ứng tĩnh và động của tấm cho cả tuyến tính và phi tuyến hình học, trong đó hiệu ứng của giảm chấn cấu trúc được xem xét, dựa trên điều khiển kín với các cảm biến và bộ truyền động áp điện. Các kết quả đạt được của phương pháp đề xuất phù hợp tốt với các lời giải giải tích và một số phương pháp tiếp cận có sẵn khác. Thông qua phân tích phần ví dụ số, các kết quả đạt được chỉ ra rằng phương pháp được đề xuất đạt được độ tin cậy cao khi so với các giải pháp khác đã được công bố trên các tạp chí uy tín. Ngoài ra, một số lời giải số cho các tấm vật liệu chức năng dán lớp áp điện có lỗ rỗng được gia cường bằng các tấm graphene và tấm vật liệu áp điện chức năng có lỗ rỗng có thể được coi là nguồn tài liệu tham khảo cho những nghiên cứu khác trong tương lai vì cho đến nay vẫn chưa có lời giải giải tích nào đưa ra.

NHỮNG ĐÓNG GÓP CỦA LUẬN ÁN

- Một lý thuyết biến dạng cắt bậc cao không ràng buộc tổng quát mới (UHSDT) được đưa ra. Lý thuyết đề xuất không chỉ không ràng buộc ứng suất cắt trên các bề mặt trên và dưới của các tấm bằng 0 mà còn không yêu cầu các hệ số hiệu chỉnh cắt. Lý thuyết này được viết dưới dạng tổng quát của các hàm phân bố. Chúng tôi đề xuất một hàm phân bố mà nó cung cấp kết quả tốt hơn so với các nghiệm tham khảo.
- Phương pháp được sử dụng là phân tích đẳng hình học (IGA). Cách tiếp cận số này được trình bày vào năm 2005 bởi Hughes và cộng sự, tuy nhiên, nó vẫn còn mới ở Việt Nam. Chỉ có nhóm PGS. TS Nguyễn Xuân Hùng đã nghiên cứu cho các lớp bài toán khác nhau. IGA đã vượt qua phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) cả về hiệu quả và độ tin cậy đối với các bài toán kỹ thuật khác nhau, đặc biệt đối với các bài toán có hình học phức tạp.
- Thay vì sử dụng IGA truyền thống, chúng tôi sử dụng IGA dựa trên trích xuất Bézier cho tất cả các chương. Mục đích chính của IGA dựa trên trích xuất Bézier là thay thế các hàm cơ sở B-spline / NURBS toàn cục bằng các hàm đa thức Bernstein sử dụng cùng một bộ hàm hình dạng cho mỗi phần tử như FEM. Theo đó, các hàm cơ sở Bernstein được áp dụng và có liên tục C^0 giống như các hàm dạng Lagrangian trong FEM.
- Cho đến nay, các nhà nghiên cứu dường như chưa nghiên cứu đáp ứng của tấm có lỗ rỗng thay đổi chức năng dán lớp áp điện được gia cường bằng các tấm graphene (PFGP-GPLs) sử dụng IGA dựa trên trích xuất Bézier cho cả phân tích tuyến tính và phi tuyến. Ngoài ra, kỹ thuật điều khiển chủ động để điều khiển các đáp ứng tĩnh và động của loại tấm này cũng được trình bày trong luận án.
- Một công thức phần tử hữu hạn đẳng hình học được đưa ra để phân tích dao động tự do của các tấm vật liệu áp điện chức năng có lỗ rỗng được chứng minh và trình bày. Trong công trình gần đây của chúng tôi liên quan đến vấn đề này, chúng tôi đã đưa ra tần số dao động tự do cho một số hình học phức tạp chưa có giải giải tích hoặc lời giải số trước đây.
- Trong luận án này, chúng tôi đưa ra nhiều bài toán có hình học phức tạp bằng cách sử dụng multipatches để tính toán. Điều này khác với các luận văn sử dụng IGA trước đây.