



**ΕΘΝΙΚΟ
ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. :
Αθήνα,

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Προς τα Μέλη ΔΕΠ της
Σχολής Μηχ/γων
Μηχ/κών

ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του Υ.Δ. κ. **ΔΑΜΙΓΟΥ Μάριου**, διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού του ΕΜΠ, την οποία εκπόνησε στον Τομέα Ρευστών. Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί την Τρίτη 25 Απριλίου 2023 ώρα 11:00π.μ. διαδικτυακά. Ο ελληνικός τίτλος της Διδακτορικής Διατριβής είναι ο εξής:

«Εισαγωγή CAD Γεωμετριών σε Βρόχους Αιτιοκρατικής Βελτιστοποίησης μέσω Οριακών Περιγραφών»

κ ο Αγγλικός ως εξής

«Insertion of CAD Geometries into Gradient-based Optimization Loops via Boundary Representations».



- Για οδηγίες για την πρόσβαση σας διαδικτυακά απευθυνθείτε στον Επιβλέποντα του Υ.Δ.. Καθ. Κ. Γιαννάκογλου (kgianna@mail.ntua.gr)



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών
Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών
Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης

Εισαγωγή CAD Γεωμετριών σε Βρόχους Αιτιοκρατικής Βελτιστοποίησης μέσω Οριακών Περιγραφών

Μάριος Δαμίγος

Επιβλέπων: Κυριάκος Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

Περίληψη Διδακτορικής Διατριβής

Η διδακτορική αυτή διατριβή ασχολείται με την εισαγωγή γεωμετριών, παραμετροποιημένων με CAD σχήματα, στη βελτιστοποίηση μορφής βασισμένη στη μέθοδο των συζυγών μεταβλητών. Παρουσιάζονται η μαθηματική διατύπωση και υλοποίηση μεθόδων που καθιστούν εφικτή την εισαγωγή του CAD σχεδιασμού σε βρόχο βελτιστοποίησης καθώς και ο έλεγχος των μεθόδων αυτών σε εφαρμογές της αεροδυναμικής. Ο υπολογισμός των παραγώγων ευαισθησίας διαφόρων αεροδυναμικών συναρτήσεων-στόχων ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού του CAD γίνεται με τη συνεχή συζυγή μέθοδο. %Οι υποθέσεις ελέγχου των μεθόδων ποικίλουν σε πολυπλοκότητα από ακαδημαϊκές έως βιομηχανικού επιπέδου και περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, επιβατικά αυτοκίνητα, εισαγωγές κινητήρων, πτερύγια συμπιεστών, αγωγούς ψύξης και εισαγωγής οχημάτων και αγωγούς ψύξης πτερυγίων στροβιλομηχανών.

Οι γεωμετρίες CAD μπορεί να έχουν δύο ειδών παραμετροποιήσεις: (α) την παραμετροποίηση δέντρου στοιχείων που ορίζει γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ στοιχείων σχεδιασμού και είναι η φυσική παραμετροποίηση των CAD πακέτων και (β) την επιφανειακή παραμετροποίηση που περιγράφεται και μεταφέρεται από το πρότυπο της Συνοριακής Περιγραφής. Η Συνοριακή Περιγραφή (Boundary Representation - BRep) αποτελείται από μία συλλογή επιφανειών που ορίζουν ένα CAD μοντέλο και ορίζονται από πρότυπες μαθηματικές περιγραφές (κυρίως NURBS). Σε αυτήν τη διατριβή, η BRep χρησιμοποιείται ως μέσο περιγραφής των CAD γεωμετριών καθώς η προτυποποιημένη, ανοιχτού κώδικα μορφή της, επιτρέπει τη σύνδεση των γεωμετριών με λογισμικά Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (ΥΡΔ) καθώς και τη χωρική διαφόρισή τους, που είναι χρήσιμη κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Η παραμετροποίηση δέντρου, είναι σπανίως διαθέσιμη σε ανοιχτή μορφή, πράγμα που κάνει τη σύνδεσή της με τη βελτιστοποίηση αδύνατη.

Το πρώτο βήμα της διατριβής είναι η γένεση ενός ποιοτικού πλέγματος με τριγωνικά στοιχεία στις επιφάνειες του CAD μοντέλου. Αυτό συμβαίνει καθώς, για να εισαχθεί το CAD στον βρόχο βελτιστοποίησης είναι απαραίτητη η πλεγματοποίηση του 3D χώρου γύρω (ή εντός) της γεωμετρίας του. Στα λογισμικά πλεγματοποίησης, συνήθως, παρέχεται το όριο του χωρίου που θα πλεγματοποιηθεί σε διακριτή (πιο συχνά τριγωνοποιημένη) μορφή. Η διαδικασία τριγωνοποίησης χωρίζεται σε τρία βήματα: (α) επισκευή μοντέλου, που είναι μια διαδικασία που επιλύει αρκετά συνήθη γεωμετρικά και τοπολογικά σφάλματα CAD γεωμετριών που εμπεριέχονται σε πρότυπα αρχεία (STEP, IGES κλπ.) (β) υπολογισμός μίας χαρτογράφησης του βέλτιστου μεγέθους τριγώνων σε ένα δευτερεύον πλέγμα και (γ) διαδικασία βελτιστοποίησης. Τα τοπολογικά κενά, επιλύονται με ελέγχους εγγύτητας και τα γεωμετρικά κενά με έναν αλγόριθμο "ραφής" που βασίζεται στην τεχνική Ελαχιστοποίησης Ενέργειας Επιφανειακών Πλακών. Έπειτα, στο "επισκευασμένο" μοντέλο, υπολογίζονται τα βέλτιστα μεγέθη τριγωνοποίησης με χρήση δύο αδιάστατων παραμέτρων, οι οποίες ελέγχουν το μέγεθος και τη μέγιστη επιτρεπόμενη μεταβολή μεγέθους. Ο συνδυασμός των δύο παράγει έναν χάρτη μεγέθους πλεγματικών στοιχείων πάνω σε ένα δευτερεύον (βοηθητικό) πλέγμα που κατασκευάζεται με τη μέθοδο Delaunay. Τέλος, πραγματοποιείται τριγωνοποίηση σε κάθε επιφάνεια ξεχωριστά με χρήση της μεθόδου Προελαύνοντος Μετώπου, προσαρμοσμένης σε παραμετρικές επιφάνειες.

Το δεύτερο βήμα είναι η δημιουργία ενός σχήματος παραμετροποίησης το οποίο θα παράσχει μία στιβαρή μέθοδο μορφοποίησης του μοντέλου. Το βήμα αυτό είναι αναγκαίο καθώς τα μοντέλα CAD συνδέονται

ισχυρώς με τις πηγαίες παραμετροποιήσεις τους οι οποίες ορίζονται μέσω δέντρων στοιχείων και δεν είναι προσβάσιμα από εξωτερικά λογισμικά. Διαφορετικά πακέτα CAD χρησιμοποιούν διαφορετικές παραμετροποιήσεις και οι διανομείς τους δεν τις κάνουν γνωστές. Συνεπώς, τα μοντέλα CAD που θα υποστούν βελτιστοποίηση πρέπει να παραμετροποιηθούν μέσω της επιφανειακής περιγραφής τους που είναι προσβάσιμη μέσω της BRep και μεταφέρεται μεταξύ λογισμικών μέσω πρότυπων αρχείων. Οι επιφάνειες που συνθέτουν ένα CAD μοντέλο είναι κομμένες παραμετρικές επιφάνειες και είναι αυτόνομες ως οντότητες σε ένα λογισμικό μορφοποίησης. Αυτό τις κάνει ακατάλληλες για εργαλεία μορφοποίησης καθώς, μετατοπίζοντάς τις, θα δημιουργούνταν ασυνέχειες γεωμετρίας και ομαλότητας στο μοντέλο. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, όλες οι παραμετρικές επιφάνειες μετατρέπονται σε NURBS και επιβάλλονται περιορισμοί συνέχειας στα σύνορα μεταξύ των επιφανειών. Στη συνέχεια, ορίζεται μία νέα παραμετροποίηση που ικανοποιεί τους ανωτέρω περιορισμούς εκ φύσεως, υπολογίζοντας τον μηδενικό χώρο του Ιακωβιανού μητρώου των περιορισμών.

Ένας παράγοντας κλειδί για τη βασισμένη-σε-CAD βελτιστοποίηση είναι η επιβολή γεωμετρικών περιορισμών. Οι περιορισμοί μπορούν με φυσικό τρόπο να ορισθούν μέσω των δέντρων στοιχείων. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, τα δέντρα στοιχείων δεν είναι προσβάσιμα και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσο μορφοποίησης των μοντέλων. Οι περιορισμοί πρέπει, συνεπώς, να ορισθούν στις επιφάνειες του CAD μοντέλου. Ανάλογα με τον τύπο του περιορισμού και την πολυπλοκότητα των επιφανειών του CAD, ο αριθμός των περιορισμών που πρέπει να επιβληθούν, μπορεί να είναι πολύ μεγάλος. Για αυτόν τον λόγο, παρουσιάζεται μία μέθοδος για τη μείωση του αριθμού των περιορισμών. Με τη μέθοδο αυτή, η παραβίαση του περιορισμού σε κάποιον κόμβο περνά από μία συνάρτηση ποινής η οποία επιστρέφει θετική τιμή σε περίπτωση που υφίσταται παραβίαση και μηδέν στην αντίθεση περίπτωση. Έπειτα, οι συναρτήσεις ποινής αθροίζονται σε κάθε κόμβο της προς σχεδιασμό επιφάνειας. Η αποτελεσματικότητα της επιβολής των περιορισμών κατ' αυτόν τον τρόπο ελέγχεται επιβάλλοντας περιορισμούς καμπυλότητας και περιορισμούς εγκλεισμού. Για να καλυφθεί και η επιβολή απλούστερων περιορισμών σε NURBS, δείχνεται και διαφορίζεται ο περιορισμός του όγκου.

Το ανεπτυγμένο λογισμικό εφαρμόζεται στο σχεδιασμό / βελτιστοποίηση διαφόρων σωμάτων που εμπλέκουν πεδία ροής όπως επιβατικά αυτοκίνητα, εισαγωγές κινητήρων, πτερύγια συμπιεστών, αγωγοί ψύξης και εισαγωγής οχημάτων και αγωγοί ψύξης πτερυγίων στροβιλομηχανών.

Το μεγαλύτερο τμήμα της διατιβής υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου IODA ITN, ενός τριετούς έργου κατηγορίας Marie Skłodowska-Curie που χρηματοδοτήθηκε από την Ε.Ε.

Λέξεις Κλειδιά: Υπολογιστική Ρευστο-Δυναμική, Σχεδιασμός με τη βοήθεια Υπολογιστή, Συνεχής Συζυγής Μέθοδος, Συνοριακή Περιγραφή Επιφανειών, Βελτιστοποίηση Μορφής, NURBS, Περιορισμοί.

Αθήνα, 2023



National Technical University of Athens
School of Mechanical Engineering
Fluids Section
Laboratory of Thermal Turbomachines
Parallel CFD & Optimization Unit

Insertion of CAD Geometries into Gradient-based Optimization Loops via Boundary Representations

Marios Damigos

Supervisor: Kyriakos C. Giannakoglou, Professor NTUA

PhD Thesis Abstract

This PhD thesis deals with the coupling of CAD-parameterized geometries with adjoint-based shape optimization. The mathematical formulation of methods for the inclusion of a CAD design in the optimization loop are shown and tested in applications in aerodynamics. The computation of the derivatives of various aerodynamic objective functions with respect to (w.r.t.) the CAD design variables is performed based on continuous adjoint running in the OpenFOAM environment.

CAD geometries may have two parameterizations: (a) a feature tree parameterization which is practically the definition of geometric relations in the 3D space and also the native parameterization of CAD packages that generate them and (b) a surface parameterization which is defined and transferred by the standard Boundary Representation (BRep) format. The latter is simply a collection of surface patches that define the CAD model, defined by standard mathematical forms (mainly NURBS). In this thesis, BRep is used to express the CAD geometry because its standardized open-source format allows its direct coupling with Computational Fluid Dynamics (CFD) software and, also, its differentiation which is necessary in gradient-based optimization. The feature tree parameterization is almost never accessible via open formats which makes its direct linking to optimization impossible.

The first step is the generation of a quality triangulation of the surface of the CAD model. This is because, in order to insert the CAD model into the optimization loop, it is necessary to mesh the 3D space around (or inside) it. The boundary of the domain to be meshed, in a tessellated (most commonly triangulated) form is the input to the meshing software. The triangulation process is subdivided into three main tasks: shape healing which is a process overcoming possible (but quite common) CAD model defects, size map computation which pre-computes the optimal size of the triangulation on a background grid and, finally, the surface triangulation itself. Shape healing handles the topological and geometric holes that commonly exist in a CAD model which is transferred via a standard file (STEP, IGES, etc.). The topological holes are fixed by performing vicinity tests, and the geometric holes are fixed by performing a sewing algorithm based on Plate Energy Minimization. Then, on the "healed" CAD model, the size map is computed using two dimensionless parameters, one controlling the triangle size based on local curvature, and the other controlling the triangle size gradation. Both parameters produce the size map on a coarse background grid computed via Delaunay triangulation. Finally, the triangulation is performed on each CAD patch separately, by using a version of the Advancing Front technique adapted to parametric surfaces.

The second step in this thesis is the establishment of the shape parameterization scheme which will provide a robust method to deform the shape. This is necessary because CAD designs are strongly related to their source parameterization which is defined via feature trees and cannot be accessed via external software. CAD packages (commercial or not) have different source parameterizations and their vendors are very sensitive about them. The CAD models must, therefore, be parameterized via their surface representation which is available via the BRep format and transferred by standard files. The surfaces comprising a CAD model are trimmed parametric patches that exist as autonomous entities which makes them unfit as shape deformation tools. This is because, displacing them would create $\$C_0\$$ and $\$C_1\$$ discontinuities in the CAD

model. To tackle this challenge, all parametric patches are converted to NURBS and a method that imposes desired continuity constraints on their trimming curves is developed. Based on this method, a new parameterization is defined which inherently satisfies these constraints by computing the Kernel of the Jacobian of all constraints.

Apart from continuity constraints, the imposition of various other geometric constraints can be a key factor in CAD-based optimization. Constraints can naturally be defined in a CAD model via the feature trees. However, as mentioned above, the feature trees cannot be accessed and used to deform the shape. Therefore, constraints must be defined on the surfaces of the CAD model. In this thesis, a method is developed to make possible the imposition of multi-node constraints on NURBS patches. Depending on the type of constraints and the complexity of the CAD surfaces, the number of node-wise constraints may become huge. Traditional constrained optimization techniques (i.e. SQP or Gradient projection) assume a priori that the number of constraints is less than or equal to the number of design variables. In the case of NURBS-based optimization, this can become problematic as the design variables are the control point coordinates which are vastly outnumbered by the number of boundary mesh nodes on the design surface. For this reason, all constraints are cast into a single equality constraint. Nodal constraint violations are penalized based on a quartic function that returns a positive value if the constraint is violated and zero otherwise. The penalties are then summed up to create a single constraint. The effectiveness of the single constraint is tested by constraining surface curvature, and enclosing constraints (i.e. constraints that demand that the model moves within a given space). For completeness, the inequality constraint of the volume of a given model is presented, to demonstrate a way of handling non-node wise constraints.

The developed software is applied to the design/optimization of test cases such as passenger cars, automotive cooling and intake ducts, diffusers and turbomachinery blades.

Major part of this work was conducted under the IODA ITN, a 3-year Research Fellowship Programme of the European Commission funded by Marie Skłodowska-Curie Actions.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Computer Aided Design Continuous Adjoint Methods, Boundary Representation of Surfaces, Shape Optimization, Non-Uniform Rational B-Splines, Constraints

Athens, 2023