

Contributions à la méthode adjointe discrète en simulation aérodynamique pour l'optimisation de forme et l'adaptation de maillage ciblée

Jacques Peter – ONERA/DAAA

La méthode adjointe discrète, a été introduite à la fin des années 80 et au début des années 90 dans le domaine de la simulation aérodynamique. Elle a permis tout d'abord, dans le cadre de l'optimisation de forme avec gradient, d'accéder au gradient des fonctions d'intérêt par rapport aux paramètres de forme avec un coût proportionnel au nombre de fonctions à dériver. On décrit les recherches menées dans ce domaine de l'optimisation des formes et aussi dans le domaine connexe de l'adaptation de maillage dite “ciblée”, visant au calcul précis d'une fonction aérodynamique.

Le mémoire rappelle tout d'abord les différentes expressions du calcul adjoint discret du gradient, notamment les équations s'affranchissant dans une première étape des paramètres de forme pour calculer la dérivée totale des fonctions d'intérêt par rapport aux coordonnées du maillage volumique, ou utilisant encore le lien entre maillage volumique et maillage de la forme solide pour calculer la dérivée totale des fonctions par rapport à ce maillage de peau (aussi appelée gradient de forme).

Les recherches menées à l'ONERA dans ce domaine concernent tout d'abord une famille de linéarisations approchées du résidu des équations d'Euler ou de Navier-Stokes, pouvant intervenir dans la simulation directe, et, transposée, dans la résolution de l'équation adjointe (Peter, Drullion, 2007). Par ailleurs, la différentiation de tous les termes spécifiques d'une formulation mécanique vitesse absolue/repère en rotation a été réalisée et a permis la première optimisation, pour le vol stationnaire, d'une pale d'hélicoptère avec une méthode de descente basée sur des gradients adjoints (Dumont et al. 2011). Enfin, dans le cadre de l'optimisation basée sur le gradient de forme en 2D, des méthodes nouvelles ont été proposées pour le lissage de ce champ et pour la définition des formes solides de régularité acceptable.

Dans le domaine de l'adaptation de maillage ciblée, les recherches ont porté sur l'usage de la dérivée totale de la fonction par rapport aux coordonnées du maillage volumique $dJ/dX = \partial J/\partial X + \lambda^T \partial R/\partial X$ (R résidu du schéma numérique, λ vecteur adjoint) pour définir un critère efficace d'adaptation pour l'évaluation de la fonction. Ce champ vectoriel relie directement la grandeur d'intérêt (J) au maillage volumique (X) et, pour des écoulements élémentaires simulés sur maillages réguliers, ses lignes iso-norme sont très proches de la carte de densité d'un maillage adapté pour l'évaluation de J ; curieusement, donc, ce champ n'a cependant été utilisé que par le NIA et l'ONERA pour l'adaptation ciblée de maillage.

L'analyse asymptotique de dJ/dX est très ardue à cause des dérivées géométriques du résidu. Il ressort d'arguments principalement heuristiques qu'un critère efficace pour l'adaptation ciblée est $\theta[J] = \|P(dJ/dX)\|/h$ où h est la (demi-)distance du noeud considéré au plus proche de ses voisins et P est un opérateur de projection ôtant toutes les composantes de dJ/dX qui altéreraient les bornes du domaine fluide. En d'autres termes, on introduit la borne de la variation au premier ordre de J causée par le déplacement (sans altérer l'objet solide, la frontière infini...) d'un noeud parmi ses voisins et on retient cette borne comme critère de raffinement.

L'efficacité de la méthode a été démontrée sur des maillages structurés pour des écoulements de fluide parfait (Nguyen-Dinh et al. 2012), sur des maillages structurés pour des écoulements turbulents de fluide visqueux (Resmini et al. 2017), sur des maillages non-structurés en 2D pour des écoulements de fluide parfait (Todarello et al. 2016). On présente aussi l'usage de la méthode par un partenaire industriel de l'ONERA.

Les perspectives de ce travail concernent, d'une part, certaines propriétés incomprises à cette date des champs adjoints de la trainée et de la portance pour des écoulements bidimensionnels de fluide parfait autour de profils, et, principalement, d'autre part, l'extension aux écoulement RANS complexes sur maillages non-structurés de la méthode d'adaptation ciblée basée sur la sensibilité au déplacement des noeuds.

Contributions to discrete adjoint method in aerodynamics for shape optimisation and goal oriented mesh adaptation

Jacques Peter – ONERA/DAAA

The discrete adjoint method has been introduced end of the 80's/beginning of the 90's in the field of Computational Fluid Dynamics. It first allowed to calculate the sensitivities of quantities of interest with respect to (w.r.t.) design parameters at a cost scaling with the number of functions. We describe research conducted in the field of adjoint-based shape optimization and also in the domain of so-called "goal-oriented" mesh adaptation (that is, aiming at the accurate calculation of a quantity of interest).

The dissertation first recalls the different forms of the adjoint-gradient equations, in particular, those first discarding the mesh sensitivity w.r.t. the design parameters, to calculate the total derivative of the goal w.r.t. the volume mesh, or, using the link between the wall mesh and the volume mesh, calculating the total derivative of the function w.r.t the wall mesh (also called shape gradient).

The first research activity conducted at ONERA in this field relates to a family of approximate linearization of the residual (of Euler or Navier-Stokes equations) that can be involved either in the resolution of the direct non-linear problem (steady state flow) or (in a transposed form) in the iterative resolution of the adjoint equation (Peter, Drullion, 2007). Besides, the differentiation of all specific terms of an absolute velocity / relative frame of reference mechanical formulation was carried out with Dumont and the first adjoint based-shape optimization of a rotor for hovering flight was conducted (Dumont et al. 2011). Finally, in the framework of 2D shape aerofoil optimization based on the shape-gradient, new methods have been defined to smooth the shape gradient and to assess sufficiently smooth airfoil shapes.

In the field of goal-oriented mesh adaptation, we defined a new criterion from the total derivation of the quantity of interest w.r.t. the volume mesh nodes: $dJ/dX = \partial J/\partial X + \lambda^T \partial R/\partial X$ (R residual of the numerical scheme, λ adjoint vector). This vector field, connects the function of interest (J) to the volume mesh (X) and, for toy CFD problems using regular meshes, the iso- $\|dJ/dX\|$ almost draw the density map of a mesh suitable for J evaluation. Nevertheless, surprisingly, this field has only been used at ONERA and NIA for goal-oriented mesh adaptation.

The asymptotic analysis of dJ/dX is very hard due to the geometrical derivatives of the residual. It stems, mainly from heuristic arguments, that a suitable adaptation criterion is $\theta[J] = \|P(dJ/dX)\|/h$ where h is (half) the distance of the node to its closest neighbor and P a projection operator removing all components of dJ/dX that would alter a boundary of the fluid domain. In other terms, we introduce a bound of the first order variation of J caused by the displacement of a node (without altering the solid body, the farfield-boundary...) between its neighbors and the retained criterion for refinement is this bound.

The efficiency of the method has been demonstrated for structured meshes and Euler flows (Nguyen-Dinh et al. 2012), for structured meshes and RANS flows (Resmini et al. 2017), and for unstructured meshes and 2D Euler flows (Todarello et al. 2016). Also illustrated is the usage of this method by an industrial partner of ONERA.

The perspectives of this work are twofold. First, some unclear features of lift or drag discrete-adjoint fields of 2D Euler flows about airfoils will be investigated. Besides, the efficiency θ criterium will be studied for complex (RANS) flows calculated on unstructured meshes.