

Mesh Morphing: sincronizzare le forme CAD e CAE

La sincronizzazione delle variazioni geometriche nei modelli CAD e CAE è alla base dei moderni metodi di ottimizzazione di forma. La complessa catena alla base della generazione della mesh del modello CAE rende spesso molto difficili le parametrizzazioni di forma, specialmente nel caso di analisi CFD dove le griglie possono contare anche centinaia di milioni di celle. Il software industriale RBF Morph è un esempio di come il mesh morphing possa realizzare un'efficace interfaccia fra questi due ambienti

La continua evoluzione delle risorse di calcolo e degli strumenti CAD e CAE rende oggi possibile una progettazione ottimizzata e robusta. I tempi di calcolo che in passato consentivano di eseguire un calcolo accurato su una specifica versione di un componente si sono ridotti notevolmente consentendo di aumentare il numero di scelte possibili ed eseguendo i calcoli con grande accuratezza.

La tendenza attuale è quindi di spingere ulteriormente avanti il concetto, passando da un numero finito di versioni del componente (decine) ad una scelta continua dei parametri di forma. Gli strumenti sono maturi. L'evoluzione di hardware e software rende possibile il calcolo di numerose variazioni del componente (centinaia).

I metodi di ottimizzazione basati sul DOE e sul metodo della superficie di risposta consentono di esplorare in modo continuo le risposte del sistema e indirizzare il progettista alla scelta ottimale dei parametri di progetto. L'unico ostacolo rimasto è proprio nella generazione parametrica delle mesh di calcolo.

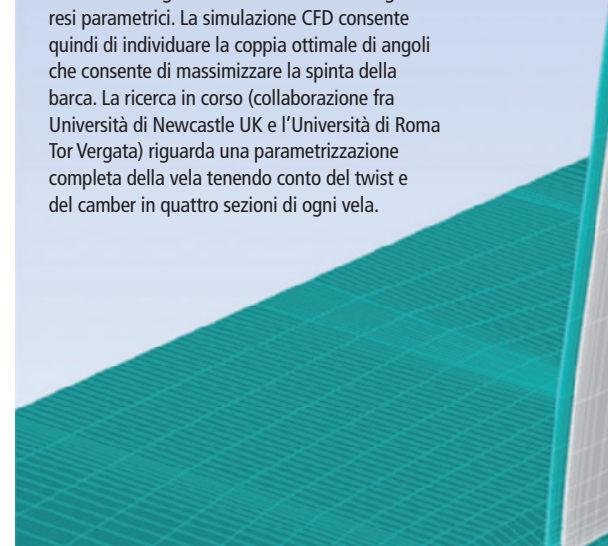
Il mesh morphing

La generazione di una nuova griglia di calcolo in base agli aggiornamenti dei parametri del CAD può risultare ancora complessa; nel caso di mesh di grandi dimensioni si tratta di una strada difficilmente percorribile. Per modelli di medie dimensioni è possibile automatizzare la generazione della mesh, ma bisogna considerare l'effetto del rumore introdotto dal re-meshing; sebbene sia piccola, la dipendenza del risultato dalla mesh può comunque essere confusa con l'effetto del parametro, ed è necessario quindi ricorrere a mesh di grandissima accuratezza.

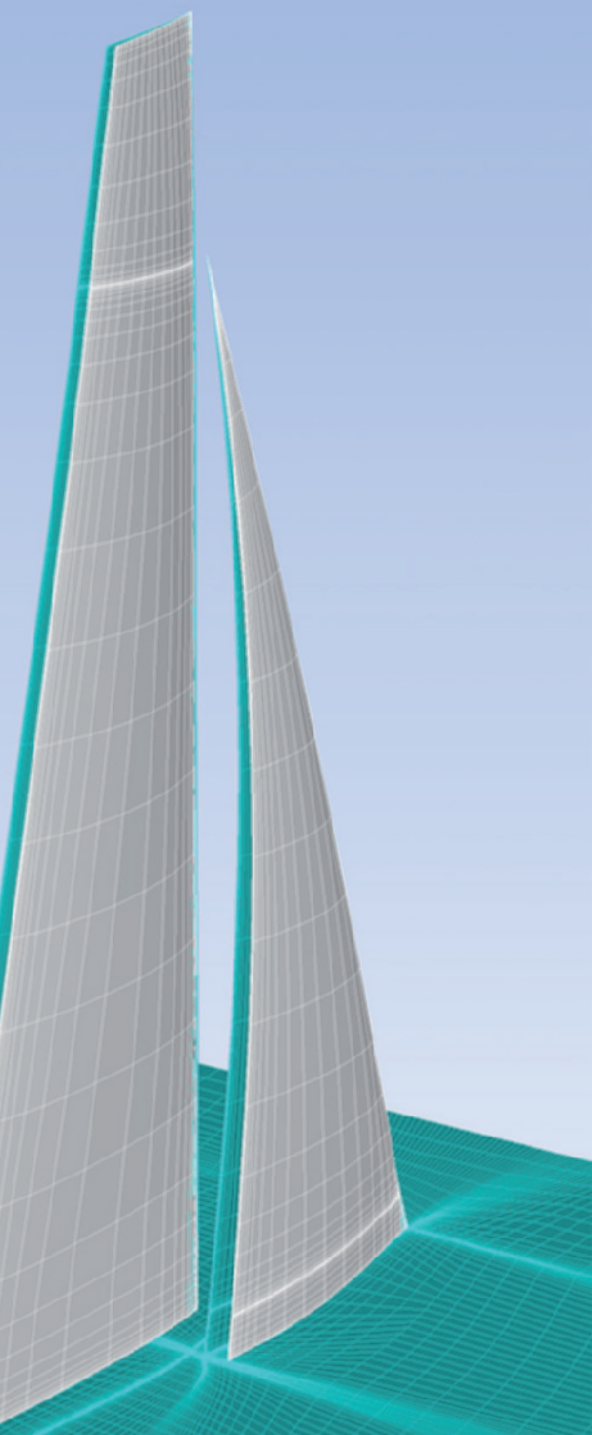
Il mesh morphing consente di cambiare la forma della griglia di calcolo riposizionando solamente le posizioni nodali, mantenendo invariata la topologia. Si hanno quindi due benefici: eliminazione del rumore dovuto al re-meshing, e drastica riduzione del tempo di update del modello.

Sono disponibili due tipologie di algoritmi per il mesh morphing. Alla prima appartengono i metodi basati sulla mesh stessa che utilizzano la soluzione di un problema

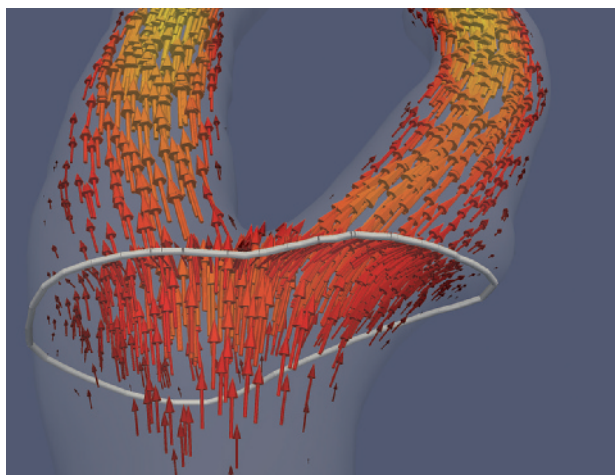
Esempio di uso del mesh morphing in campo nautico. Gli angoli di assetto delle vele vengono resi parametrici. La simulazione CFD consente quindi di individuare la coppia ottimale di angoli che consente di massimizzare la spinta della barca. La ricerca in corso (collaborazione fra Università di Newcastle UK e l'Università di Roma Tor Vergata) riguarda una parametrizzazione completa della vela tenendo conto del twist e del camber in quattro sezioni di ogni vela.



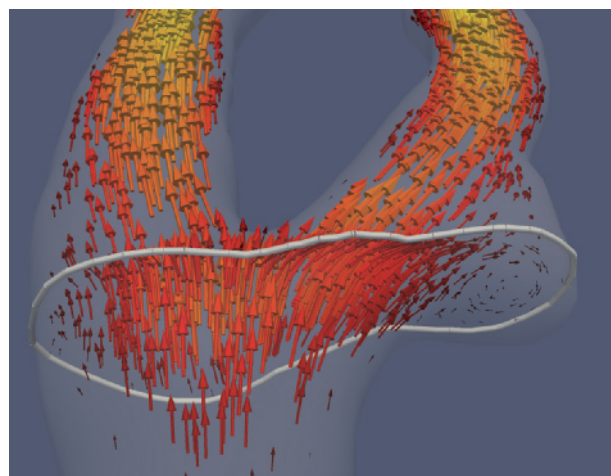
differenziale (ad esempio un calcolo elastico non lineare) per aggiornare la mesh di volume in base agli spostamenti che sono stati imposti al bordo. Alla seconda appartengono i metodi basati sul Free Form Deforming (FFD) che non usano la mesh ma una maglia di box interconnessi il cui cam-



po di spostamento è parametrizzato utilizzando i polinomi di Bernstein. La prima categoria consente di mantenere una qualità molto elevata e di controllare in modo molto preciso le superfici; risulta difficile da implementare nel caso di mesh parallele di notevoli dimensioni, soprattutto in presen-



Il modello CFD di una biforcazione carotidea è stato parametrizzato per simulare la crescita di un aneurisma del bulbo carotideo. Vengono riportate due configurazioni, la prima relativa al paziente sano, la seconda in presenza di un aneurisma. Notare come il cambiamento di forma abbia un importante effetto sull'emodinamica di questo distretto. Lo studio presentato a puro scopo dimostrativo evidenzia come il mesh morphing possa diventare un prezioso strumento nel campo della medicina predittiva.



za di elementi speciali (interfacce non conformi, poliedri, ...). I metodi della seconda categoria, per la loro natura meshless, risultano semplici da implementare e gestiscono con facilità ogni tipologia di elemento anche in parallelo; tuttavia non riescono a garantire la stessa qualità dei metodi basati sulla mesh e non consentono un controllo preciso delle superfici.

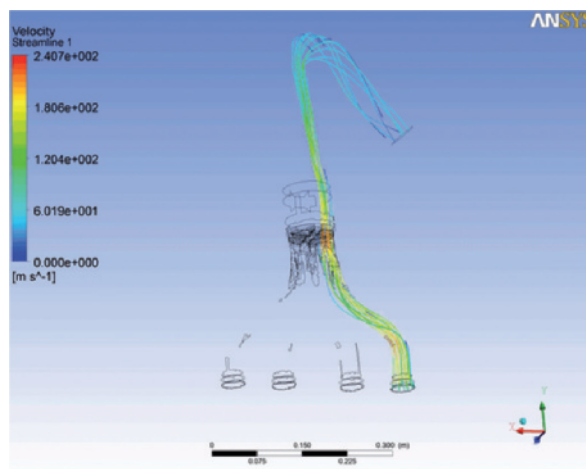
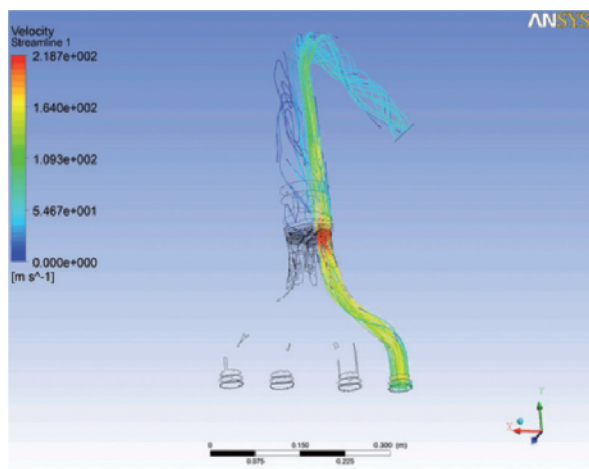
Un approccio molto promettente consiste nell'utilizzo delle Radial Basis Functions (RBF) che consentono di controllare la griglia mediante una nuvola di punti a spostamento imposto. Tale metodo unisce ai vantaggi dei metodi meshless una grande precisione.

Si tratta di un metodo innovativo che pone due grandi problemi: la grande difficoltà numerica nella risoluzione di sistemi RBF con

tanti punti (oltre i 10.000), la mancanza di paradigmi per la definizione di nuove forme (ovvero di metodi semplici per posizionare i punti sorgente e definirne lo spostamento). Il software RBF Morph [1] è la prima, e ad oggi unica, implementazione industriale delle RBF per il mesh morphing. Si tratta di uno strumento nato in forma di add-on per il solutore CFD ANSYS Fluent che a breve sarà disponibile anche come prodotto stand alone e quindi fruibile in tutti i campi del CAE.

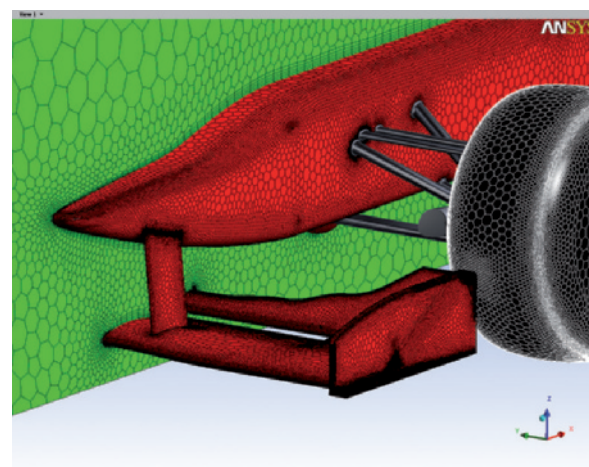
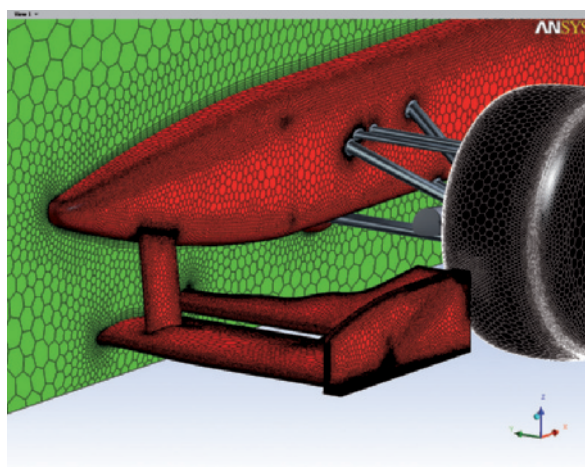
Il software RBF Morph

Lo sviluppo di RBF Morph è iniziato alla fine del 2007 come strumento custom nell'ambito di una consulenza industriale per un top team di Formula 1 con l'obiettivo di parametrizzare la forma di modelli



Il modello CFD del condotto di scarico di un motore pluricilindrico è stato parametrizzato cambiando la forma delle curve dei tronchetti di scarico, la rastremazione del condotto finale, la forma e l'angolo del tratto in uscita. Si riporta l'andamento delle linee di flusso sia per la configurazione originale che per quella ottimizzata. La nuova configurazione presenta un flusso più regolare, rende uniforme la perdita di carico dei quattro cilindri e minimizza la perdita di carico complessiva.

Il modello CFD della parte anteriore di una vettura di Formula 1 viene modificato per ottimizzare il muso ("ugly nose") nel rispetto delle specifiche del regolamento 2011. Come spesso accade nel mondo del motorsport, i progettisti devono poter aggiornare molto rapidamente la forma aerodinamica. Come ben noto la ricerca della forma ottima è vincolata in modo molto severo dai regolamenti. Grazie al mesh morphing è possibile valutare in tempi brevissimi l'effetto di un nuovo parametro di forma.



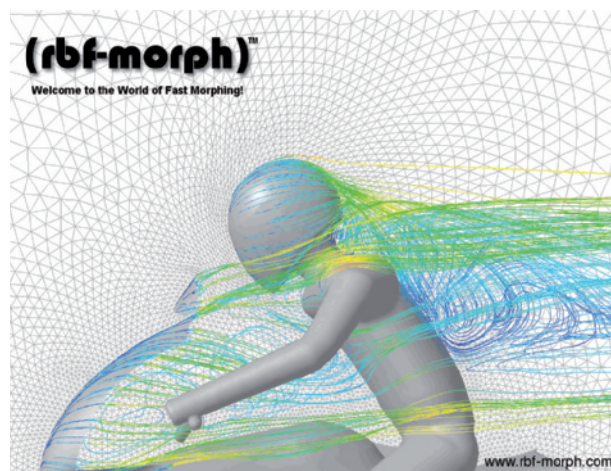
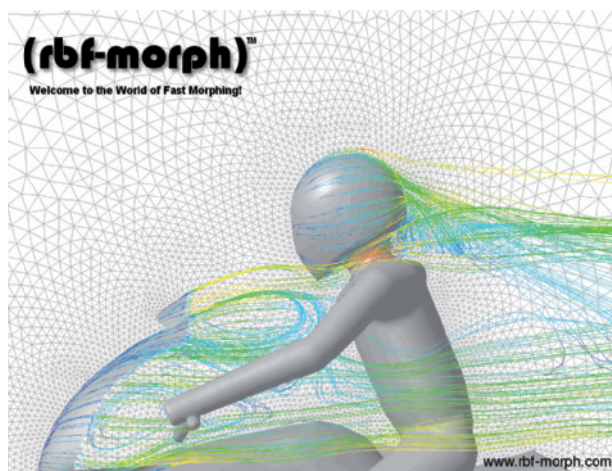
CFD di grandi dimensioni. Nel 2009 è stata rilasciata la prima versione commerciale di RBF Morph, subito premiata in occasione della European Automotive Simulation (EASC) come Most Advanced Approach using integrated and combined simulation methods. RBF Morph consente di definire la parametrizzazione della forma direttamente all'interno del Fluent, ovvero a valle di tutte le operazioni necessarie per la preparazione del modello accelerando in modo sostanziale i tempi di sviluppo e ottimizzazione di un nuovo componente. Come già illustrato, le maggiori difficoltà legate a questo nuovo metodo sono: il tempo di calcolo e la definizione dei punti sorgente. Entrambe superate nel corso di due anni di intense ricerche, grazie all'impiego di algoritmi numerici allo stato dell'arte e ad una suite di strumenti di selezione dei

punti RBF che rende il metodo fruibile per l'ottimizzazione di forma. La prima versione del morpher (inizio 2008) consentiva di realizzare fit da 10.000 punti in circa 45 minuti; dopo due anni lo stesso fit può essere eseguito in pochi secondi e un fit da 2.600.000 punti richiede circa 2 ore. Ciò significa che oggi una mesh da 100 milioni di celle può essere spostata usando 500.000 punti sorgente in circa 15 minuti (tempo totale per fit + morphing). Anche i criteri per la definizione dei punti sorgente si sono arricchiti nel tempo per dare risposta ad applicazioni sempre più complesse. Le prime versioni consentivano di definire i punti solo sulle superfici della mesh; oggi RBF Morph consente di estrarre i punti su set di superfici e bordi, di posizionare punti su entità geometriche notevoli (box, cilindri, sfere), di assegnare

vari tipi di movimenti per ognuno di questi insiemi di punti e di definire un numero arbitrario di punti individuali, ognuno controllato individualmente. Questi tre criteri possono essere combinati rendendo lo strumento molto flessibile. La parametrizzazione di forma si ottiene sovrapponendo e modulando un numero arbitrario di soluzioni RBF. L'effetto della singola soluzione o di una soluzione multipla può essere visualizzato come anteprima direttamente sulle superfici di interesse in fase di set-up.

RBF Morph e il CAD

Lo strumento di mesh morphing si pone a metà strada fra il CAD e la mesh. Rende assai veloce l'aggiornamento della forma ma rimane comunque il problema di collegare la forma CAE con la forma CAD. Le soluzioni ad oggi individuate sono due. La



Il modello CFD del sistema motociclo-pilota è stato reso parametrico rispetto alla statura del pilota, alla posizione di guida e all'angolo del deflettore del cupolino. Grazie al modello CFD parametrico è stato possibile individuare la configurazione di miglior comfort "su misura" per il pilota. La figura rappresenta l'andamento delle linee di flusso per due delle 45 configurazioni esaminate; notare come la struttura della scia sia influenzata dai parametri in esame.

prima consiste nel definire le nuove parametrizzazioni di forma direttamente sulla mesh. Tale approccio può sembrare limitativo, ma in molte applicazioni ha portato ad esplorare forme difficili da pensare e a priori difficilmente ottenibili con una parametrizzazione CAD. In questo caso la forma ottimale può essere riportata nel CAD utilizzando il morpher per applicare ai punti del modello geometrico lo stesso campo di deformazione usato per muovere la mesh. Si usa in questo caso una versione in formato step del modello geometrico modificato in modo da poter accettare le modifiche imposte (le aree da modificare devono essere trasformate in NURBS).

La seconda strada, più recente, consente di assegnare direttamente la nuova forma, così come calcolata dal CAD, mediante una superficie STL. Tale superficie viene trasformata in una superficie implicita RBF su cui viene poi proiettata la mesh della superficie originale. Tale metodo risulta molto efficace ma è delicato da controllare, specialmente se si hanno spostamenti importanti dei bordi delle superfici.

Applicazioni di RBF Morph

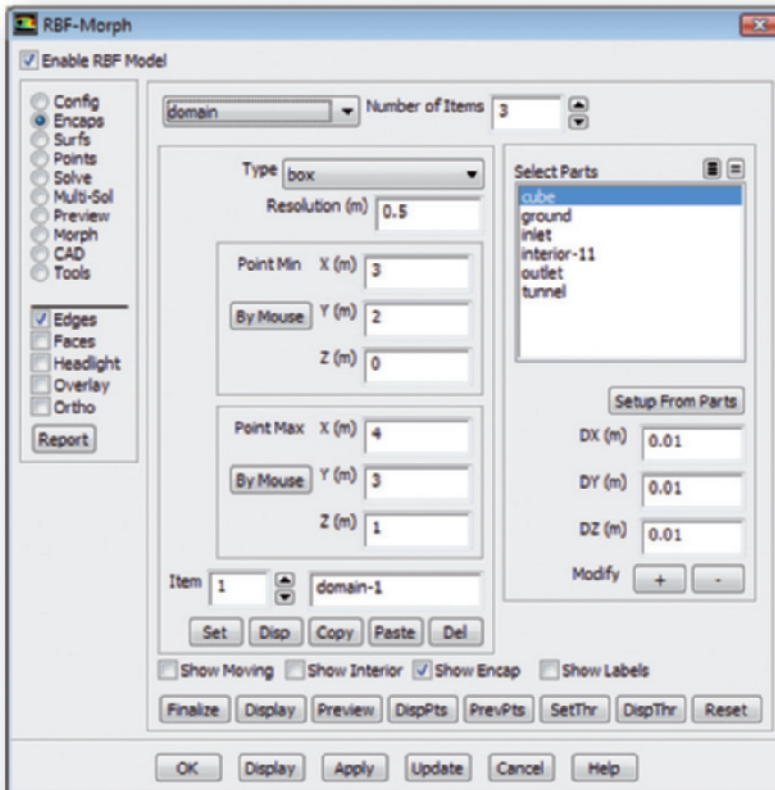
RBF Morph è nato nella Formula 1, settore in cui è oggi molto apprezzato [2]. Consente infatti di rendere parametrico il set-up del modello CFD della macchina (regolazioni ali, carreggiate, altezze da terra, sterzata delle ruote) e di ottimizzare la forma di alcuni particolari aerodinamici. Come

spesso accade, le innovazioni introdotte in questo settore vengono poi estese ad altri campi applicativi. Il primo studio affrontato ha riguardato l'ottimizzazione del comfort di guida di una moto equipaggiata con un parabrezza Variotouring [3]. Grazie ad RBF Morph è stato possibile considerare l'effetto della regolazione del deflettore al variare dell'altezza del pilota e della posizione di guida. La prima applicazione su flussi interni ha riguardato il condotto di aspirazione della monoposto del team Formula SAE dell'Università di Roma Tor Vergata [4]; la forma è stata ottimizzata in modo da rendere omogenea la distribuzione della carica sui quattro cilindri massimizzando il riempimento volumetrico. A questa prima applicazione sono seguite poi numerosi casi industriali relativi a sistemi di aspirazione e scarico di motori. Lo stesso metodo viene utilizzato anche per l'ottimizzazione dei sistemi di distribuzione dell'aria condizionata. Il software è stato usato con successo anche in campo emodinamico per la simulazione dell'evoluzione di una placca in un bulbo carotideo, in campo aeronautico sia per l'ottimizzazione di una ala che per il calcolo aeroelastico, in campo nautico per l'ottimizzazione della regolazione delle vele di una barca da regata. Fra le applicazioni avanzate è interessante riportare: il movimento transitorio della mesh per le interazioni fluido struttura e per i flussi eccitati da strutture in movimento; l'uso dei target STL per imporre al modello CFD le

forme acquisite sperimentalmente. Con tale approccio è possibile studiare l'effetto delle deformazioni dello pneumatico di una vettura di Formula 1; mediante il blending continuo di forme STL è possibile imporre un'evoluzione nota del movimento dei bordi, un progetto attivo riguarda la stima dell'effetto della pulsilità delle pareti sullo studio fluidodinamico di un arco aortico. In campo automotive è stato usato dalla MIRA Ltd (UK) per lo studio di una forma sperimentale di riferimento per gli studi in galleria del vento, e dalla ANSYS Inc. in un progetto dimostrativo chiamato "50:50:50" [5]. Grazie ad RBF Morph è stato possibile valutare 50 forme diverse utilizzando una mesh da 50 milioni di celle in sole 50 ore.

Il futuro di RBF Morph

RBF Morph è oggi usato con successo nel campo della CFD grazie alla forte integrazione con il Fluent. La natura meshless del metodo consente di portare le nuove forme su mesh diverse della stessa forma con grande facilità. La nuova versione stand alone dell'interfaccia consente di definire il set-up con gli stessi strumenti già presenti nell'add-on ma partendo da formati di mesh generici sia di superficie che di volume (CGNS, STL e Nastran). La libreria di morphing può essere quindi collegata direttamente all'applicazione dove è necessario modificare la forma (rendendo disponibile il morphing all'interno del calcolo)



L'interfaccia grafica dell'add-on RBF Morpher consiste in un pannello riconfigurabile (normalmente controllato in discesa agendo sui radio-button). Grazie alla forte integrazione con ANSYS Fluent l'utente CFD ha la possibilità di rendere parametriche le forme interagendo con la mesh nell'ambiente in cui è abituato a lavorare. La semplicità d'uso dell'interfaccia consente di mettere a punto la parametrizzazione di forma in poche ore, risparmiando il tempo di generazione di una nuova mesh che può richiedere anche alcuni giorni.

oppure può essere utilizzata per interagire con formati di mesh specifici (in questo caso l'aggiornamento non viene eseguito in memoria ma sul file che contiene la mesh). Tale approccio è stato valutato per portare le soluzioni di morphing in altri strumenti della stessa ANSYS (ICEM, CFX, Mechanical), o in altri solutori come OpenFOAM. Sono in corso degli esperimenti per l'uso di RBF Morpher per la simulazione dell'evoluzione della crescita di una cricca di fatica e per tener conto delle deformazioni termo-strutturali in un'analisi di tipo elettromagnetico (HFSS).

Ulteriori applicazioni

Il metodo delle RBF è stato utilizzato con successo anche in altri campi. Le RBF possono essere infatti usate nel post-processing DOE e producono superfici di risposta molto regolari (performance dello stesso livello sono possibili solo con il metodo di Kri-

ging). E' in corso una ricerca sull'uso delle RBF per l'interpolazione di campo di moto emodinamici acquisiti in vivo; l'interpolazione assai accurata può essere utilizzata per estrarre informazioni importanti dal flusso senza dover eseguire un'analisi CFD inter-

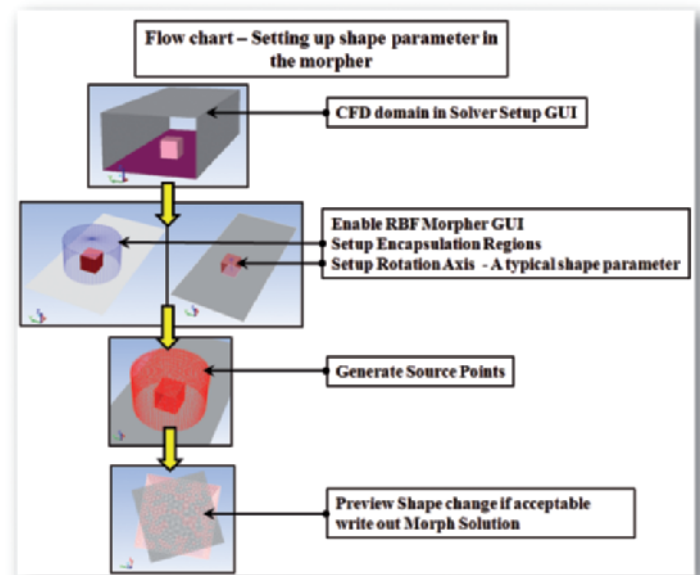
Riferimenti

Biancolini, M. E., Mesh Morphing and Smoothing by Means of Radial Basis Functions (RBF): A Practical Example Using Fluent and RBF Morph in Handbook of Research on Computational Science and Engineering: Theory and Practice, IGI Global, ISBN13: 9781613501160.

D. Caridi & A. Wade, HIGHER-SPEED CFD, Professional Motorsport Magazine Issue of April. M.E. Biancolini, C. Biancolini, E. Costa, D. Gattamelata, P.P.Valentini, Industrial Application of the Meshless Morpher rbf-Morph to a Motor-

bike Windshield Optimisation, European Automotive Simulation Conference, Munich, Germany, July 2009.

E. Abbasciano, M.E. Biancolini, "Shape morphing of CFD Models: Fluent and RBF Morph combine for the Optimisation of a FSAE Car Airbox", Ingegneria dell'Autoveicolo VOL. 64 N.1/2 Jan/Feb 2011 Paper ATA A. Khondge, S. Sovani, "An Accurate, Extensive, and Rapid Method for Aerodynamics Optimization: The 50:50:50 Method", SAE Technical Paper 2012-01- 0174, 2012, doi:10.4271/2012-01-0174



Workflow per la definizione di un nuovo parametro di forma utilizzando RBF Morpher. L'interfaccia consente di definire punti sorgente mediante numerosi criteri: su insiemi di superfici, su volumi notevoli mediante immissione diretta. Il campo di spostamento imposto a tali punti consente poi di plasmare la nuova forma delle superfici e di adattare la mesh di volume mediante il campo di deformazione interpolato dalle RBF.

© RIPRODUZIONE RISERVATA