

コウイカのヒレ運動による推進と姿勢制御に関するシミュレーション

Numerical computation of Fin Motion of Cuttlefish for its Propulsion and Posture control

○森 勇人, 京工繊大院, 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町
 山川 勝史, 京工繊大, 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町
 松野 謙一, 京工繊大, 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町
 Yuto MORI, Kyoto Inst. Tech., Matsugasaki, Kyoto
 Masashi YAMAKAWA, Kyoto Inst. Tech., Matsugasaki, Kyoto
 Kenichi MATSUNO, Kyoto Inst. Tech., Matsugasaki, Kyoto

Control of posture and trajectories during aquatic locomotion is forefront in understanding locomotor mechanics in nature. For example, cuttlefish which swim with undulating two long fin of side body is well known to have superior characteristic for control of posture. However, simulation for cuttlefish is seldom seen and the mechanism is still unexplained. In this study, to find out the optimum condition for posture control of fin motion, we perform simulation swimming cuttlefish. Coupled simulation of fluid and motion dynamics enable to calculate motion of cuttlefish by flow of undulating fin. The motion of six degree of freedom is calculated with Moving Computational Domain Method. In this paper, circular motion by undulating fin different in right and left is simulated and compared with experience of swimming squid-like robot. And it is shown that the computational method work is effective. Furthermore, by using this method, fin motion going straight ahead is examined.

1. 緒言

水生生物は、数億年の間それぞれの環境・大きさに合わせて進化し、高度な最適化・効率化が果たされ現在の形態や運動特性を得ている。そしてその運動は流体と密接に関係し、その流体を利用する優れたメカニズムに起因していることが知られている。そのため、様々な水生生物の運動から学ぶことは多いと考えている。そのような生物の中に、胴体側面のヒレのうねりによって遊泳するコウイカがある。この遊泳方法は周囲の流れへの影響が少なく、細かな動きが可能であることから、姿勢の制御に優れていると言われている。したがって、例えばこの動きを魚型ロボットに取り入れることで、海藻が絡まることなく、海底の泥をまき上げづらいう水中移動が可能になり、またアームでの作業時において細かな姿勢の制御ができると考えられる。

さて、コウイカの遊泳については古くより研究されており、Kierら¹⁾はコウイカのヒレ運動が筋肉組織の複雑さにも関わらず、波動遊泳モードにおける魚のヒレで表現されるものとほぼ同じうねりを示すことを示唆している。また、Rahmanら²⁾はコウイカの側ヒレを模したロボットの研究開発を行い、ヒレのうねりによって推進・回転が行えることを示している。しかし、その姿勢制御そのものに関する研究はほとんど見られない。姿勢の制御が可能になることで、潮流や波浪など外乱の影響が多い場合でもスムーズに海中作業や生態調査を行うことができる。そのため、姿勢を制御する機構の研究は重要となる。その解析手法としてロボットを用いた実験が考えられるが、コストがかかり様々な条件での検討が容易ではない。そこで、数値流体力学による検討が有効となってくる。一方で、シミュレーションの手法として、コウイカの運動は主に流体力によって行われるため、経路を厳密に決めておくことはできず、流体と運動の相互作用を考える必要がある。そこで、流体力学と運動力学の連成シミュレーションを行う。

以上より本研究では、推進時や停止状態において姿勢を最適に制御するためのヒレ運動を明確化することを目的として、数値流体力学と運動力学の連成シミュレーションを行う。本紙では、この連成計算手法の検証として、側ヒレ型ロボットによる実験とシミュレーションの運動を比較することで信頼性を示した。また、コウイカのモデルを用いてヒレ運動のシミュレーションを行い、直進を行うヒレ運動の検討を行った。

2. 計算手法

2.1 流体の基礎方程式

本研究が対象とする流れは、非定常非圧縮性流体である。そこで、流体の基礎方程式は連続の式と三次元非圧縮 Navier-Stokes 方程式であり、それぞれ次式のようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \mathbf{E}_v}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_v}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}_v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

ここで \mathbf{q} は保存量ベクトル、 \mathbf{E} , \mathbf{F} , \mathbf{G} は x , y , z 方向の粘性流束ベクトル、 Re はレイノルズ数を表し、 u , v , w は x , y , z 方向の速度、 p は圧力を表す。また、 \mathbf{E}_v , \mathbf{F}_v , \mathbf{G}_v における添字 x , y , z は各方向微分を表している。

2.2 数値計算手法

離散化手法には、非構造移動格子有限体積法³⁾を用いる。移動格子項と移流項の評価には2次精度風上差分近似、粘性項の評価には中心差分型離散近似を用いた。非圧縮性流体の解法として Fractional Step 法を用い、1st step の反復解法には LU-SGS 法、圧力方程式の解法には Bi-CGSTAB 法を用いた。

2.3 物体の運動

物体の任意運動を扱うために、3次元空間における並進運動と回転運動を含めた6自由度の運動方程式を用いる。並進運動はニュートンの運動方程式を、回転運動はオイラーの運動方程式を用いる。それぞれの運動方程式は次式のようになる。

$$\frac{dp_G}{dt} = F_G \quad (3)$$

$$\frac{dL_G}{dt} + \omega_G \times L_G = N_G \quad (4)$$

ここで、 p_G は物体にかかる運動量、 F_G は物体にかかる外力、 L_G は物体の重心からの角運動量、 ω_G は角速度、 N_G は物体にかかるトルクである。

流体の計算には、著者らが提案した MCD 法⁴⁾を用いた。この手法では、領域を制限することなく、物体の自由な運動の計算を可能とする。

2. 4 空間格子の移動

移動境界問題を解析するには格子を移動変形させる必要がある。その際に格子の重なりやつぶれた格子が発生してしまえば計算が破綻してしまう。本研究では複雑な運動をする移動境界問題を取り扱うため、3次元非構造格子においてその有効性が確かめられているねじりバネの効果を模擬した方法⁽⁵⁾を採用する。また、物体周辺の格子の歪みを緩和するためにスムージング⁽⁶⁾処理も施す。

3. 連成シミュレーションの検証

流体と物体の連成シミュレーション手法の検証として、側ヒレ型ロボットによる実験⁽²⁾との比較を行う。比較する運動として、左右のヒレの振動数の差による円運動を扱う。

3. 1 計算モデル

計算モデルをfig.1に示す。全長1.3m, 最大幅0.714m, 厚さ0.1m, ヒレ長さ0.874m, ヒレ幅0.075m, 重さ62.8kg, の側ヒレ型ロボットの諸元を参考に、無次元長さで全長を代表長さの1としてモデル化した。要素数は2,875,222である。なお、本モデル及び以降のモデルの格子形成にはMEGG3D⁽⁷⁾⁽⁸⁾も使用した。座標系は、長さ方向にx軸, 幅方向にy軸, それらと垂直な方向にz軸とし、x軸周りをロール, y軸周りをピッチ, z軸周りをヨーとする。

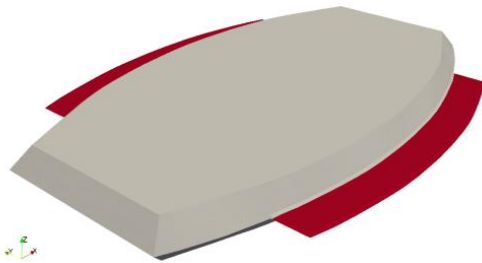


Fig.1 model of squid-like robot

3. 2 ヒレ運動の条件

ヒレ運動は進行波運動であり、その条件を次式に示す。

$$\theta = \theta(s) \sin(2\pi Ks - 2\pi Nt) \quad (5)$$

$$\theta(s) = \sin^{-1} \left[\left\{ 1 - 0.905 \left(\frac{s}{fL} - 0.5 \right)^2 \right\} \sin \theta_{max} \right] \quad (6)$$

ここで、 θ はヒレの根元から先までの角度、 K は波数、 N は振動数、 fL はヒレの長さ、 s はヒレの先からのx方向長さ、 θ_{max} は最大角度である。条件は実験と同様に、波数を1, 最大角度を45°, 振動数は左側のヒレを0.5Hz, 右側を1.0Hzとして計算した。

3. 3 計算条件

代表長さ(全長)1.3m, 代表速度0.5m/s, 水の動粘性係数 $1.004 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ として算出した $Re=640000$ として計算する。モデルは静止流体中を移動すると仮定する。移動方法として、静止状態から、ヒレ運動の移動条件を与え、運動方程式を解くことによる連成計算を行った。境界条件として外部境界では速度外挿, 圧力固定とし、物体表面での速度は移動速度であり、壁面圧力は加速度を考慮したノイマン条件とした。

3. 4 計算結果

円運動時のxy平面の速度分布をfig.2に、物体座標系におけるx方向にかかる物体全体, 右ヒレ, 左ヒレにかかる力を示す。また, fig.4にトルクの時間履歴を示す。Fig.2を見ると、振動数が大きい右側のヒレでは左側に比べ、流れの速度が大きくなっている。また、速度の大きい領域がヒレ周辺のみであることから、ヒレ運動の流れの特徴をとらえていることが分かる。Fig.3より、右ヒレにおいて左ヒレより大きな推進力がかかっていることがわかる。

左右のヒレに推進力の差が生まれることで、平面的な円運動となっている。fig.4より、z軸周りのトルクがヒレ運動開始からかかり、その後は周期的となっている。また、x軸周り, y軸周りのトルクは0を中心として周期的となっていることから、ヨー方向のみの円運動となっていることが分かる。また、力とトルクのグラフから、トルクは10秒までに一定になり、進行方向の逆向きに抵抗がかかっている。

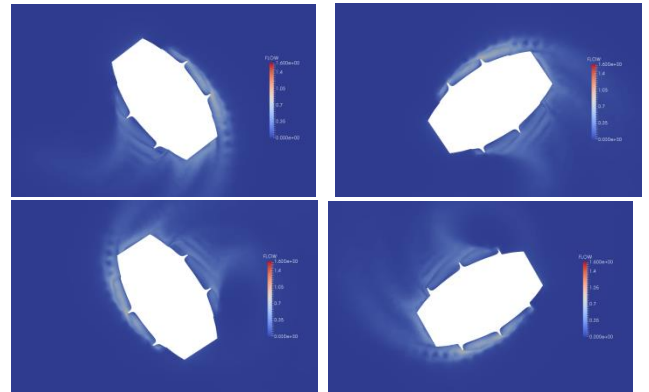


Fig.2 velocity distribution in circular motion

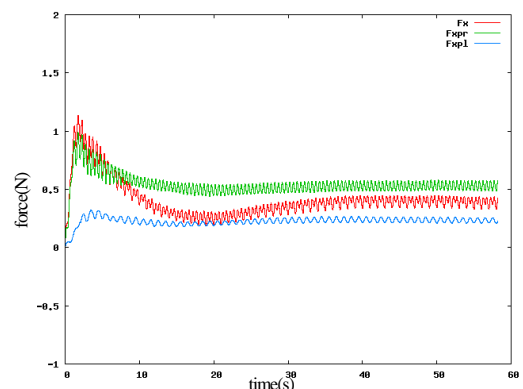


Fig.3 time history of force in circular motion

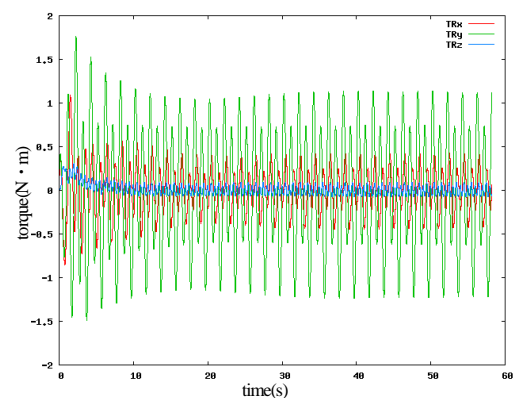


fig.4 time history of torque in circular motion

Fig.5に実験とシミュレーションそれぞれのxy平面における重心の軌跡を示す。グラフから、運動の軌跡が定性的に一致しており、同様の運動を行っているといえる。また、その円運動の回転直径を比較すると、実験は1.34m, シミュレーションでは1.25mであり、誤差は6.9%と良好に一致している。以上の事から、連成計算手法の有効性を確認した。

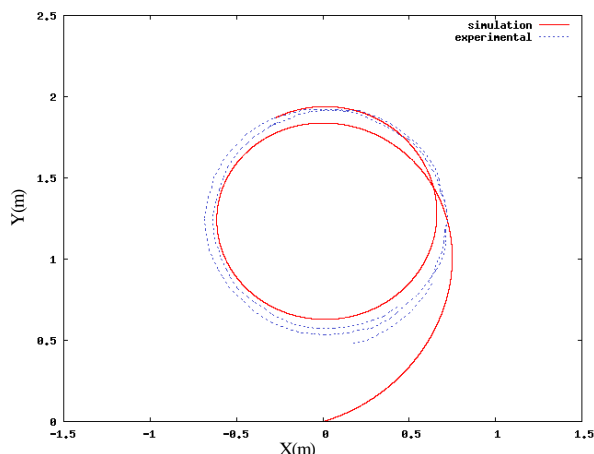


Fig.5 trace of the center of gravity in circular motion

4. ヒレ運動シミュレーション

4. 1 計算条件

ヒレ運動による移動のシミュレーションとして、fig.6 に示すコウイカモデルを用いた連成シミュレーションを行った。モデルが直進するヒレ運動の計算を行った。

代表長さ（全長）0.2m、代表速度 0.1m/s、水の動粘性係数 $1.004 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ として算出した $Re=19200$ として計算する。モデルは静止流体中を移動すると仮定する。移動方法として、静止状態から、ヒレ運動の移動条件を与え、運動方程式を解くことによる連成計算を行った。境界条件として外部境界では速度外挿、圧力固定とし、物体表面での速度は移動速度であり、壁面圧力は加速度を考慮したノイマン条件とした。

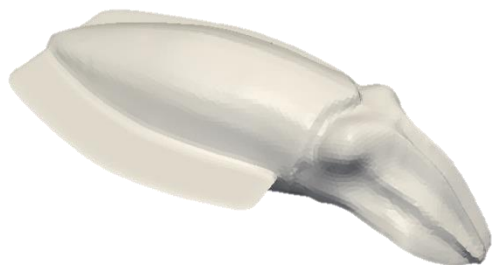


fig.6 model of cuttlefish

4. 2 ヒレ運動の条件

ヒレの進行波運動の条件を次式に示す。

$$\theta(x, t) = \theta_{\max} \sin\left(2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_f}{\lambda}\right)\right) \quad (3)$$

ここで、 θ はヒレの根元から先までの角度、 T は周期、 λ は波長、 x_f はヒレの先からの x 方向の位置、 θ_{\max} は最大角度である。パラメータとして左右のヒレを同様に、周期を 0.4、最大角度を 20° 、波長をヒレの長さの $2/3$ として計算した。また、進行波運動の進行方向は頭から足の方である。

4. 3 計算結果

計算結果として無次元時間 $t=12$ までのコウイカの運動の軌跡を fig.7 に示す。モデルが沈みながら、ヒレ運動の進行方向と逆向きに直進するような軌跡を描いている。また、fig.8 に角度の時間変化を示す。グラフから、ヨー方向、ロール方向に変化しておらず、ピッチ方向のみに変化する運動であることが分かる。このことから、このヒレ運動により姿勢がブレることがない推進が可能であることがわかる。

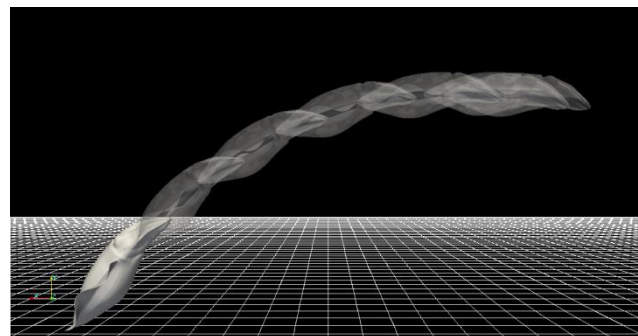


fig.7 trace of motion

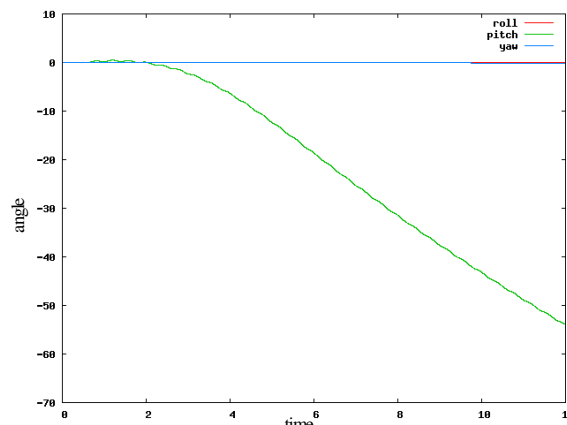


fig.8 time history of angular change

コウイカ周りの流れ場の様子として、ヒレ周りの xz 平面での圧力を示す。Fig.9 は無次元時間 $t=7.5$ 、fig.10 は無次元時間 $t=8.0$ におけるものである。進行波の山の前方部分で高圧、後方部分で低圧となり、推進力を生み出す流れとなっていることがわかる。また、周期的な流れとなっていることから、推進方向以外の速度が生まれず、推進方向の速度だけが生じていると考えられる。また、fig.11 に物体中心での xz 平面の圧力分布を示す。これより、圧力が脚部の下部にかかっていることがわかる。この脚部への力がかかり続けることで、物体にピッチ方向の回転が生じていると考えられる。よって、このヒレ運動が沈みながら直進する軌跡を描く原因は、モデルの形状によるものだと考えられる。

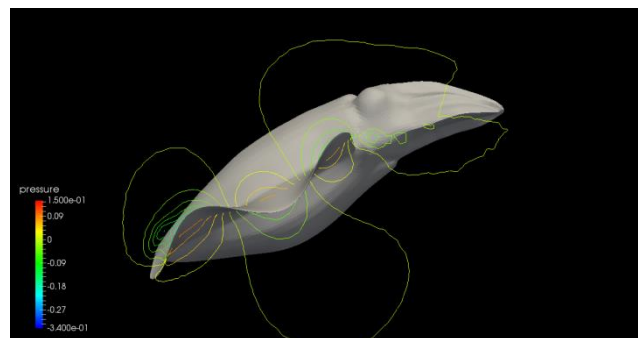


fig.9 pressure distribution around fin at $t=8.0$

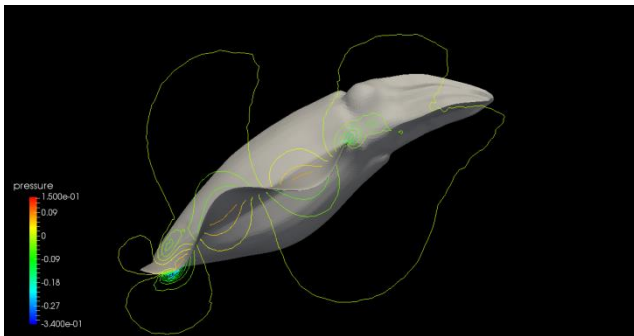


fig.10 pressure distribution around fin at t=8.0

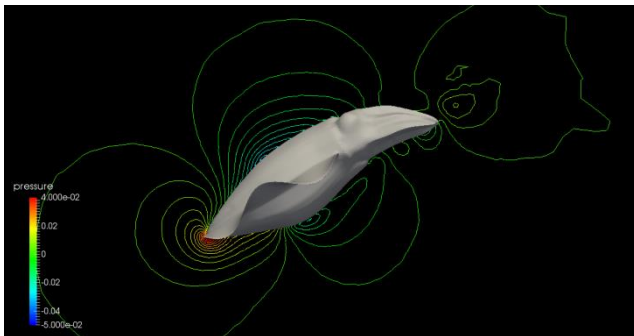


fig.11 pressure distribution around body at t=8.0

fig.12 に無次元時間 $t=8.0$ における Q 値の等値面を示す。 Q 値とは、速度勾配テンソルの第二不変量であり、渦構造を抽出するのに用いられる指標である。これより、ヒレの外側の先端および後縁において Q 値の変化が見られる。進行波運動によって逆カルマン渦状の渦⁽⁹⁾が生じているときに、効率のよい振幅運動であるとされている。流れの詳細を見るために、fig.13 で示す位置における断面での圧力分布と速度ベクトル線図を fig.14 に示す。この結果から、ヒレの端から逆カルマン渦状の正負の渦が交互に発生しており、効率のよい推進を行うヒレ運動の流れの特徴を捉えていることがわかる。

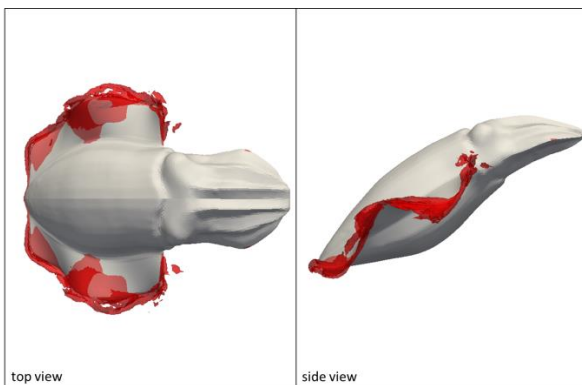


Fig.12 Q value distribution at t=8.0

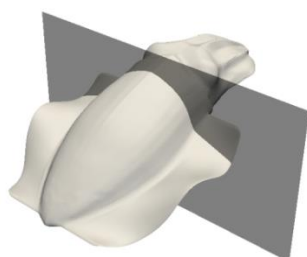


Fig.13 yz-plane cross cuttlefish

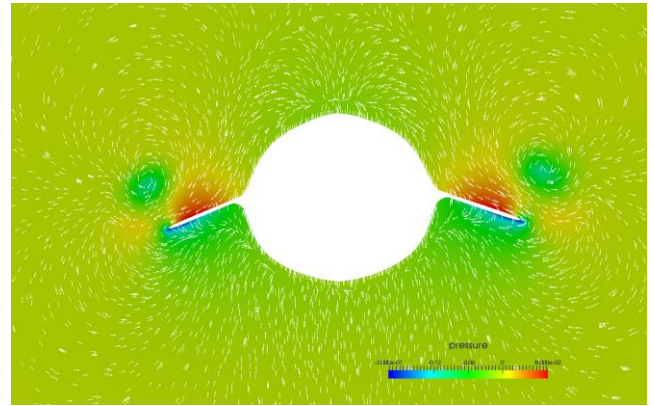


Fig.14 pressure distribution and vector diagram in yz-plane

5. 結論

非構造移動格子有限体積法と物体の運動方程式の連成計算手法を用い、円運動を行うヒレ運動のシミュレーションを行い、実験との比較を行った。計算と実験の結果が良好に一致していることから、ヒレ運動による流れの計算および流体力による物体の移動を伴う計算が行えることを示した。また、コウイカのモデルを用いたヒレ運動の計算を行い、直進を行うヒレ運動の特徴を把握することが出来た。

参考文献

- 1) S. Johnsen and W.M.Kier, Intramuscular crossed connective tissue fibres:skeletal support in the lateral fins of squids and cuttlefish, Department of Biology, Land, 231, (1993), pp.311-338.
- 2) Rahman, M. M., Miki, H., Sugimori, S., Sanada, Y. and Toda, Development of a Real Time Simulator Based on the Analysis of 6-Degrees of Freedom Motion of a Biomimetic Robot with Two Undulating Side Fins. Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms. 3(1),(2013),pp. 71-78..
- 3) 三原清孝, 松野謙一, 里深信行, “移動格子有限体積法 (第一報, 基礎的定式化と検証)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 65, No. 637 (1999), pp. 2945-2953.
- 4) Watanabe, K. and Matsuno, K., “Moving Computational Domain Method and Its Application to Flow Around a High-Speed Car Passing Through a Hairpin Curve”, Journal of Computational Science and Technology, Vol.3, No.2, (2009), pp.449-459.
- 5) George A.Markou, Zacharias S.Mouroutis, Dimos C.Champis and Manolis Papadrakakis, The ortho-semi-torsional (OST) spring analogy method for 3D mesh moving boundary problems, ScienceDirect, 196, (2007), 747-765
- 6) Tian Zhou, Kenzi Shimada. "An angle-based approach to two-dimensional mesh smoothing", 9th International Meshing Roundtable(2000)
- 7) Ito, Y. and Nakahashi, K. , “Surface Triangulation for Polygonal Models Based on CAD Data” , Internal Journal for Numerical Method in Fluids, Vol.39, Issue 1, (2002), 75-96
- 8) Ito, Y., “Challenges in Unstructured Mesh Generation for Practical and Efficient Computational Fluid Dynamics Simulations” , Computational Fluid Dynamics Simulations” ,Computer & Fluids,47-52
- 9) Wu, T. Y.: Swimming of a waving plate, J. Fluid Mech., Vol.10, pp.321-344, 1961.