

No. 13

遺伝的アルゴリズムを用いた 滑空機設計の最適化

飯田明由, 岩崎正志, 水野明哲 (工学院大学)

Design Optimization of Gliders for Birdman Rally Contest by using a Genetic Algorithm

Akiyoshi Iida, Masashi Iwasaki, and Akisato Mizuno

Department of Mechanical Engineering, Kogakuin University

ABSTRACT

Nowadays, the flight distance of champion team of the birdman rally contest was over 400 m. In order to break the record, we have to consider the weather conditions, flight conditions and design optimization of the glider. For this purpose, we developed the three-dimensional flight simulator and the optimization program based on genetic algorithm. The simulation result of the three-dimensional flight simulator was reasonably agreement with the real flight. GA optimization was carried out with two hundreds samples and fifty generations. The dominant genes of airplane for the contest were obtained with GA. The performance map showed the optimal airplanes such as the champion team were sensitive and not easy-handle. The simulator was suggested another optimized model with flexible wing that was not sensitive to flight conditions. The proposed model got the fourth prize and the referee's award of the birdman rally contest 2005.

Keywords : Glider, Optimal design, Genetic algorithm, Flight-simulation, Optimization

1 序論

毎年夏に琵琶湖で行われている鳥人間コンテストでは、高さ10mのプラットフォームから動力なしでどこまで飛行できるかを競う競技が行われている。著者らの所属する工学院大学でも Birdman Project Wendy として活動しており、滑空機の設計、製作を行っている。現在の滑空機の記録は400mを超えており、この記録を超えるには最適な機体設計と操縦技術が必要となってくる。しかし、滑空機の設計においては考慮すべき設計変数の数が多く、最適な設計を行うのは容易ではない。また、コンテストは湖の上で行われており、事前に練習することが難しい。

そこで滑空機の飛行プログラムをつくり、滑空機の飛行条件とその最適化をコンピュータで解析することでテスト飛行ができない欠点を補うことを試みた。

設計パラメータ間の相互関係があまり明らかになっていない滑空機の設計を最適化するために、本研究では遺伝的アルゴリズム (GA) を使用した。これは、GA は多点探索を行うため局所解に収束する可能性が少ない、目的関数が不連続でも適用できるなどの利点があり、機体設計に適していると考えられるためである。GA の欠点としては計算時間が長い⁽¹⁾という問題があるが、これについては飛行解析プログラムの負荷が小さいため、大きな欠点とはならないと考えられる。

GA を実施する際、外乱に強い安定した飛行が可能な滑空機を目的関数とした。これは鳥人間滑空機が事前に練

習がほとんどできないことから、姿勢変化や当日の気象条件に左右されないような確実に飛行する機体が必要なためである。

本研究では鳥人間コンテスト用の滑空機を最適化するため、鳥人間用滑空機の運動を模擬した飛翔解析プログラムと GA を用いた最適化手法について検討し、機体設計について最適化を行った結果について報告する。尚、解析に使用した滑空機は2005年度の鳥人間コンテストで4位（大学チームでは2位）に入賞し、審査員特別賞を受賞した。

2 解析手法

2.1 鳥人間用滑空機の飛翔解析

本研究は滑空機の飛翔経路を計算するため、機体の揚力及び抗力を考慮した3次元飛翔解析プログラムを作成した。機体の運動方程式は、

$$m(\dot{U} + QW - RV) = -mg\sin\Theta + X_a \quad (1)$$

$$m(\dot{V} + RU - PW) = mg\cos\Theta\sin\Theta + Y_a \quad (2)$$

$$m(\dot{W} + PV - QU) = mg\cos\Theta\sin\Phi + Z_a \quad (3)$$

$$I_{xx}\dot{P} - I_{xz}\dot{R} + (I_{zz} - I_{yy})QR - I_{xz}PQ = L \quad (4)$$

$$I_{yy}\dot{Q} + (I_{xx} - I_{zz})RP + I_{xz}(P^2 - R^2) = M \quad (5)$$

$$-I_{xz}\dot{P} + I_{zz}\dot{R} + (I_{yy} - I_{xx})PQ + I_{xz}QR = N \quad (6)$$

と記述することができる⁽²⁾⁽³⁾。ここで m は機体質量、 g

は重力加速度, また機体に固定された座標軸を機体軸とすると, U, V, W は機体軸方向の速度, P, Q, R は機体軸まわりの角速度, Φ, Θ は姿勢角, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} は機体軸に対する慣性モーメント, I_{xz} は慣性乗積, X_a, Y_a, Z_a は機体軸方向に作用する空気力, L, M, N は機体軸まわりに作用するモーメントである. また, 鳥人間用滑空機の運動を模擬する際, 本研究で用いた飛翔解析プログラムでは, 滑空機の運動に対して重要な影響を与えると考えられる, 地面効果, 翼のたわみ, および風の影響を考慮した.

地面効果は, 機体が地面に近づくと, 機体の下側の空気が機体と地面にはさまれ, より高圧になって大きな揚力を発生する現象である. 地面効果は実験により,

$$AR_e = AR_\infty \left\{ 1 + 33(H/b)^{3/2} \right\} / 33(H/b)^{3/2} \quad (7)$$

と表される(3). ここで AR_∞ は高度 $H = \infty$ の場合のアスペクト比であり, b は翼幅である. (7) 式により有効アスペクト比 AR_e が求まり, この値を3次元揚力傾斜 $\partial C_L / \partial \alpha$, 誘導抗力係数 C_D , 吹き下ろし角 ε を求める式にの代わりに代入する. 以下に代入した式を示す.

$$\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} = \frac{a_0}{1 + \frac{a_0}{\pi AR_e}} \quad (8)$$

$$C_{Di} = \frac{C_L^2}{\pi AR_e} \quad (9)$$

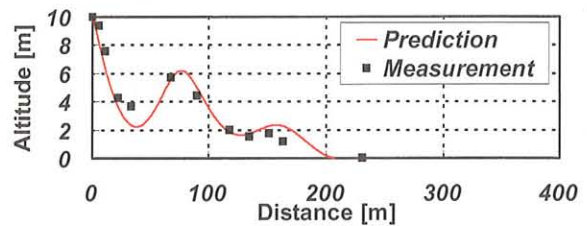
$$\varepsilon = \frac{2C_L}{\pi AR_e} \quad (10)$$

ここで, a_0 は2次元翼揚力傾斜, C_L は揚力係数である.

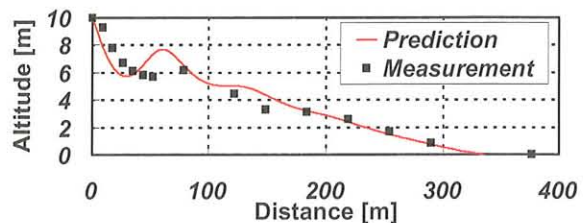
鳥人間用滑空機の翼は軽量化を図るため主桁にカーボンパイプを用いている. このため, 図1に示すように, 翼は飛行中に揚力を受け大きく反ってしまう. そのため翼に働く揚力は翼が反った分だけ傾くため, 機体を持ち上



Fig.1 Picture of airplane for the birdman rally contest : Birdman Project Wendy, Kogakuin Univ.



(a) Kogakuin University (Wendy)



(b) Mitaka-Mobara (Winner of the contest)

Fig.2 Simulation results of flight orbits of glider

げるための有効な揚力成分が減少する. このことを考慮するため, 翼をスパン方向に分割し, 各要素に働く揚力から翼要素のたわみ角を算出した. 計算したたわみ角を元に翼要素毎の有効揚力成分を計算し, 翼全体に作用する実質的な揚力を算出した.

風の影響は機体の速度と風の速度を合成し, 対気速度を算出し, その値を用いて空気力の計算を行った. 飛翔解析プログラムの検証をするため, 解析結果とビデオ撮影から求められた実際の飛行経路の比較結果を図2に示す. (a) は本学鳥人間サークルの飛行経路, (b) は優勝チームの飛行経路である. 縦軸のレンジが10mに対して横軸のレンジが400mのため, 高さ方向の誤差が大きく見えるが飛行距離の推定誤差は10%程度である. 飛翔解析プログラムがほぼ実際の飛行をシミュレートしていることがわかる.

2.2 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (GA) は生物の進化を模倣した最適化アルゴリズムであり, 適当な遺伝子 (設計パラメータ) の組み合わせの中から, 目的関数を満たす優秀な個体を選別する方法である. GA では優秀な設計候補を選択し, 選択された個体から遺伝子である設計変数を次世代が受け継いで進化させていくことにより, 最適解を探ることが可能であり, 滑空機のように設計パラメータの多い場合に効果的な手法である.

本研究では選択の手法としてトーナメント手法を用いている. トーナメント手法は2つの個体の評価値を比較して, 優れている個体の方を生き残らせる手法である.

各個体に与えられる設計変数はそれぞれ0と1のビット列で表現した. 一つ一つのビットを遺伝子とし, 遺伝

子が連なったものを染色体とした。設計変数からビット列に変換する際、一度2進数に変換し、その後グレイコードに変換する手法を用いた。グレイコードを用いると、隣り合った数値に変化する際、ビット列の変更点が1箇所ですむため、連続関数においては最適解の探索効率を向上させることができる。

交叉、突然変異はそれぞれ交叉確率、突然変異確率を定め、乱数によりそれらの操作を行うか判定させた。交叉が起こると判定された場合、染色体上の一点を乱数で決定し、その点から半分のビット列を親となる個体同士で交換させた。また、突然変異が起こると判定された場合、染色体上の一点を乱数で決定し、その点のビットを反転させた⁽⁴⁾。その世代で得られた個体の全てを選択、交叉、突然変異の対象とすると、優秀な個体を選ばれない可能性や、交叉、突然変異の操作で改悪される個体ができる可能性がある。そこで、その世代で最も優秀な個体を選択、交叉、突然変異の対象とせず、そのまま次世代に受け継ぐエリート戦略を導入した⁽⁵⁾。エリートの数は1個とした。

2.3 最適化問題の定式化と制約条件

機体の設計変数として翼スパン、翼弦長、テールパイプ長、飛び出し角等8個とした(図3)。設計変数の定義域等についてまとめたものを表1に示す。設計変数をビット列に変換するために、設計変数の定義域をそのビット列で表現できる情報量(本研究では5ビット=32段階)で分割し、その各段階の値をとる手法を用いた⁽⁶⁾。

計算によって得られた設計変数から機体の質量、慣性モーメント、アスペクト比、翼面積を計算し、機体の評価に用いた。また本研究では翼型を設計変数とせず一定とした。機体各部の寸法変化に伴う重量及び重心位置は各ケースごとに求めた。

最適設計を行う際、制約条件を課す必要がある。滑空機的设计においては制約条件がなければ、アスペクト比をできるだけ大きくすれば飛行距離が伸びると予想される。実際は構造力学的にアスペクト比に限界があり、制約条件を課すことによって、正当な最適解が得られると考えた。

鳥人間用の機体では揚力を支えるため主翼桁部に大きな荷重がかかる。特に翼の付け根の部分は最大曲げモーメントがかかるため、この部分の強度について制約条件を課すことにした。飛行中に主翼に作用する最大応力 σ とカーボンパイプの許容応力 σ_a を比較し、 $\sigma > \sigma_a$ となる時、飛行中に翼が破断したと判断する。この場合は、評価値が0となるため、その個体は選択されないことになる。

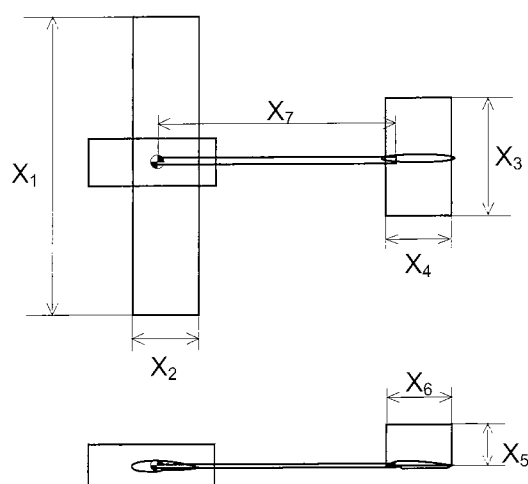


Fig.3 Parameters of design variable

Table1 Design variables in chromosome

Design variable	Admissible values	Granularity	Number of bits	Bit position in chromosome
Wing span	$20 \leq X_1 \leq 26\text{m}$	32	5	1 to 5
Wing chord	$0.8 \leq X_2 \leq 1.4\text{m}$	32	5	5 to 10
Horizontal tail span	$1 \leq X_3 \leq 10\text{m}$	32	5	11 to 15
Horizontal tail chord	$0.1 \leq X_4 \leq 2\text{m}$	32	5	15 to 20
Vertical tail span	$1 \leq X_5 \leq 8\text{m}$	32	5	21 to 25
Vertical tail chord	$0.1 \leq X_6 \leq 2\text{m}$	32	5	25 to 30
Tail pipe length	$1 \leq X_7 \leq 10\text{m}$	32	5	31 to 35
Diving angle	$-20 \leq X_8 \leq 5\text{deg}$	32	5	35 to 40

3 解析結果

最適化する際のGAの条件として各世代の個体数を200とした。世代数は50とし、計算終了までに要した時間は約6分であった。交叉、突然変異ともに50%の確率で起こるものとした。今回の計算では設計候補を得るまでの収束計算はほぼ40世代で収束し、最適解が得られた。

飛行解析プログラムの解析初期条件である初速度は、鳥人間コンテストでの状況を勘案し、5.5m/sとした。また、制約条件である許容応力は、カーボンパイプの破壊強度の実験値0.8GPaと安全率3から0.27GPaとした。

図4は縦軸に水平尾翼のモーメントアーム、横軸に主翼スパン長をパラメータとした解析結果である。400mを超える飛行が可能な設計条件の機体もあれば、飛行距離の小さな機体もある。この図からテールパイプの長さは自由度が高く、他の条件を適切に選ぶことにより3mから9mの範囲で自由に選ぶことができる。一方、主翼の長さは飛行距離に大きく影響し、300mを超える機体は主翼長さ20m以上でないと実現できない。このようなことは飛行機的设计としては基本的なことであり、新しい知見とはいえないが、実際に鳥人間滑空機を作成しているのは高校を卒業したばかりの大学1年生から2年生である。テールパイプの長さを決めるだけでも非常に苦労することから、解析によって設計指針が得られるメリットは大

きい。最適化解析により、飛行距離や安定性に特に敏感な設計パラメータは主翼桁のヤング率、主翼零揚力角、主翼空力中心位置、水平尾翼取付角であることがわかった。反対に尾翼の翼弦長、主翼取付角、尾翼の3次元揚力傾斜の変更は飛行距離に対してそれほど敏感ではないことから、設計時には上記の飛行距離に敏感なパラメータを優先させて設計を行った。

これらの知見を元に外乱に強い機体の抽出を行った。鳥人間滑空機ではプラットフォームから飛び出した後は、ピッチング以外のコントロールを行うことは難しく、特にロール角に対する制御は機体の基本性能に依存してしまう。このため、離陸時に傾くとそのまま旋回して墜落するケースが多い。このことを考慮して、初期ロール角0度の場合と10度の場合の飛行距離を計算した。図5に解析結果を示す。縦軸は初期ロール角が10度の場合、横軸は初期ロール角が0度の場合である。図の対角線上に近いほど、初期姿勢にかかわらず安定した飛行が可能であることを示す。

昨年、工学院大学で作成した滑空機は図の横軸上にあり、外乱に対して弱いことがわかった。昨年の機体はわずかなロール角で失速してしまうこともわかった。また、横軸上の350m付近にある■印は、大会優勝機の結果である。この機体は350m近い飛行が可能であるが、やはり外乱に対しては弱く、大会優勝チームは機体作成技術だけでなく操縦技術に長けていることがわかる。横軸200m、縦軸150m付近にある◆は工学院大学の2005年大会モデルの結果である。この機体は初期ロール角が大きくなっても150m以上の飛行が可能である。最大飛行距離は前年度のものよりも劣るが大会で確実に記録を残すには、このような安定した機体が望ましい。特に飛行練習を行うことが難しいこと、社会人チームに比べ学生チームはメンバーの入れ替わりがあるため、飛行経験をつむことが難しいので、安定した機体の設計は重要であり、そのような設計を行うには本研究のようなシミュレータと最適化プログラムが有効であることがわかる。機体の安定性は主翼の初期上半角及び飛行中のたわみに左右されるため、主翼の曲げ剛性が重要となる。やわらかすぎると飛行距離が短くなるので、機体の安定性を考慮しながら、飛行距離を伸ばす工夫が必要である。

4 まとめ

鳥人間用滑空機の運動を模擬した飛行解析プログラムを開発し、遺伝的アルゴリズムを用いた最適化手法を用いて機体設計の最適化を行った。

機体設計の最適化に寄与するパラメータの検討や外乱に対する影響について遺伝的アルゴリズムを用いて調べた。遺伝的アルゴリズムによる分析を基にした滑空機は実際の大会でも安定した飛行を実現し、2005年度大会に

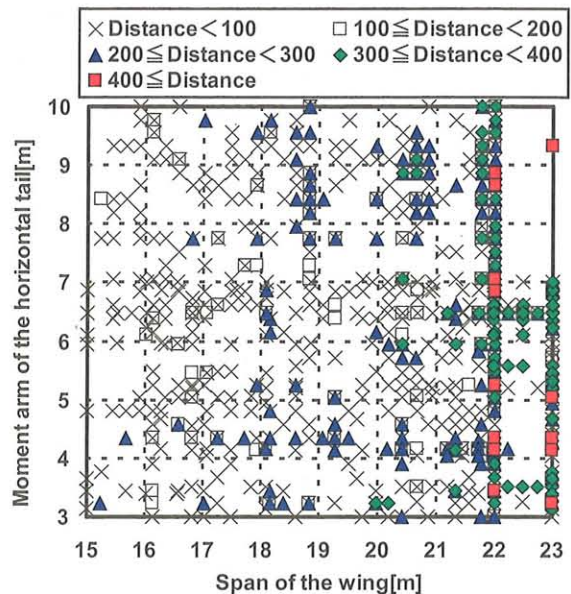


Fig.4 Distribution of flight performance of glider

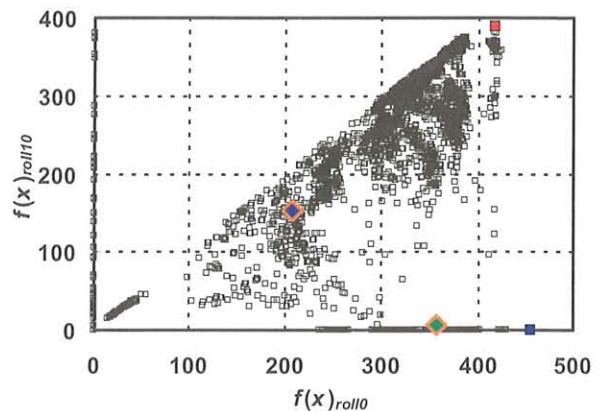


Fig.5 Performance map of glider against pitch angle

において滑空機部門4位（大学チーム2位）、審査員特別賞を受賞した。

参考文献

- (1) 大林 茂, CFD 利用の新段階—数値最適化, 日本機械学会誌, 第105巻, 第999号, (2002) 64 - 69
- (2) 加藤 寛一郎, 大屋 明男, 柄沢 研治, 航空機力学入門, 東京大学出版会, (1982)
- (3) 東 昭, 航空を科学する (下巻), 酣燈社, (1995)
- (4) 平野 廣美, 応用事例でわかる遺伝的アルゴリズムプログラミング, パーソナルメディア, (1995)
- (5) 三宮 信夫, 喜多 一, 玉置 久, 岩本 貴司, 遺伝アルゴリズムと最適化, 朝倉書店, (1998)
- (6) Andre C. Marta, Parametric Study of a Genetic Algorithm using a Aircraft Design Optimization Problem, Genetic Algorithms and Genetic Programming at Stanford 2003, (2003) 133 - 142