

スポーツ最適化問題の現状と課題

瀬尾 和哉

スポーツにおける最適化問題の研究例として、スキージャンプ飛翔の最適化を紹介する。この紹介を通して、目的関数をシミュレーション可能な物理量に変換する点が本質で、今後の課題でもあることを指摘する。

キーワード：多目的最適化，目的関数，スキージャンプ

1. はじめに

スポーツの研究といえば、体育分野（バイオメカニクス）の研究者が盛んに行ってきた。バイオメカニクス研究者の典型的な研究手法は、エリート選手の運動を高速カメラによって撮影し、その力学的妥当性を検証する方法である。後に続く選手は、そのエリート選手に学ぶ。学んだ後は、経験に基づき、さらなるパフォーマンスの向上を目指す。これには試行錯誤が必要で、時間がかかる。別の方法は、合理的な最適化手法を利用したスポーツスキルの最適化である。この方法では、求められた最適スキルが到達目標として教示されるため、経験に基づくスキル改善よりも短時間で最適スキルを獲得できる。

今回、スポーツにおける最適化の研究例として、スキージャンプの飛翔局面の最適化を紹介する。

2. 最適化手法—我々の場合—

我々は、当初、最急勾配法等により、最適化を行っていた[1]。最急勾配法では、求められた最適解が大域的最適解（局所最適解ではなく）に到達しているかどうか、が問題になる。このためには、最適化計算の出発点を変えながら複数回の計算を行うことにより、判断できる。研究者が問題に対する深い知識を持っているならば、研究者の眼力に基づき最適解に近そうな計算出発点から最適化を開始し、大域的最適解に到達できる。しかし、そうでない場合には、局所最適解にしか到達できない恐れがある。そこで、最近は、より頑強（ロバスト）な最適化手法である遺伝的アルゴリズム（GA: Genetic Algorithm）により、多目的最適

化（Multi-Objective Optimization）を行っている。

我々のような最適化を利用する立場で、重視することを列記すると、

- ① 最適化プログラムが扱いやすいこと
- ② 大域的最適解にたどり着く手法であること
- ③ 計算時間が短いこと

である。③に関しては、1日、2日の計算時間ならば、待てる範囲である。②に関しては、現在、どのような最適化手法を用いようとも真に最適化することは困難である。GAには質が良い解を得る力があるという意味で、満足している。最も重要なのは、①プログラムの扱いやすさである。流体力学研究者は伝統的にFortranを使用してきた。著者もFortranを最も得意としている（蛇足ながら、本当に最も得意とする言語は、学生時代に鍛えられたN88Basicである）。そのため、当初は、Fortranで記述した最急降下法のプログラム（参考書[1]にFortranのサンプルプログラムが掲載されていた）を使っていた。しかし、多目的最適化問題に移行するにあたり、C言語で記述されたエリート主義のGAであるNSGAI[2]を使用した（サンプルプログラムがC言語であった）。現在は、再びFortranで記述したARMOGA（Adaptive Range Multi-Objective GA）[3]を使用しており、快適である。

3. スキージャンプ

スキージャンプの勝敗は、トータルポイントシステムで決まる。トータルポイントとは、飛距離点と飛型点の合計点である。飛距離点は、K点（建設基準点）まで飛ぶと60点、K点に対して飛距離1mの増減で、1.8点の増減（ラージヒルの場合）となる。一方、飛型点は、5人の審判制で、各20点の持ち点方式である。0.5点刻みの減点法で、最高点と最低点をつけた2人の審判を除く、3人の審判の合計が飛型点となる。

せお かずや

山形大学 地域教育文化学部

〒990-8560 山形市小白川1-4-12

飛距離はシミュレーション可能であり、数値化できる。しかし、飛型は審判の主観による。感性に関わる量、例えば、きれい、強そう、気持ちいい等、を数値化することは困難である。飛型点もそれに当たる。スキージャンプの飛翔局面（踏切や着地局面ではなく）の主な減点例[4]は、「風の抵抗をうまく利用できていない」、「肩、腕を必要以上に揺らす」、「スキーが揺れる」、「手をぐるぐる回す」等である。そこで、我々は、飛型点=安定性と解釈し、前傾角（後述）の分散を飛型点と解釈し、飛距離と前傾角の分散の2目的最適化を行った。

スキージャンプは、ジャンプ台を滑り降りるアプローチに始まり、踏切、飛翔、着地の4局面に分けられる。今回は、飛翔局面（踏切後0.3秒以降～着地までの安定した滑空局面）における2目的最適化を紹介する。

4. スキージャンプの空力特性

飛距離や前傾角の分散をシミュレーションするためには、スキージャンプに働く空気力を知り、さらに運動方程式を数値積分する必要がある。前者は風洞実験により、後者はルンゲクッタ法により可能である。

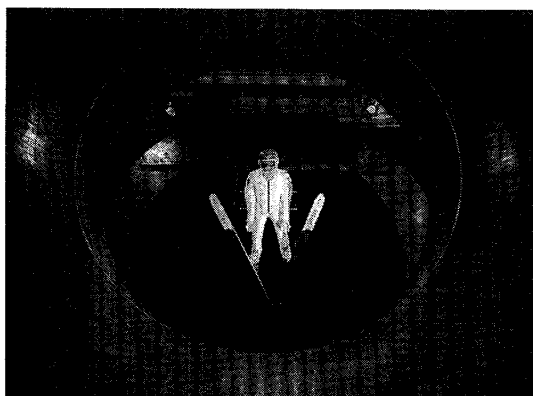


図1 スキージャンプの風洞実験

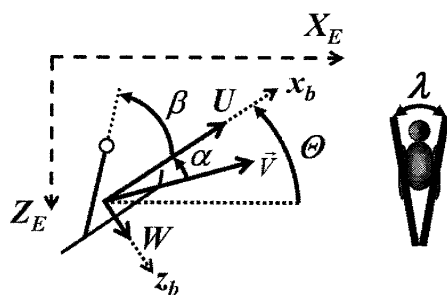


図2 変数の定義

我々は、実物大スキージャンプモデルを製作し、模型に働く空気力（抗力、揚力、ピッチングモーメント）を測定した[5]。実験の写真を図1に示した。実験では、図2に示した迎え角 α （飛翔軌跡方向とスキー板のなす角）、前傾角 β （体幹とスキー板のなす角）、V字開き角 λ を変数とした。

5. スキージャンプ飛翔の最適化

5.1 目的関数

目的関数は、2つ、

$$F_1 = -\text{飛距離},$$

$$F_2 = \text{前傾角の分散}$$

とした。最適化では、両目的関数を同時に最小化することになる。

表1 制御変数

#	制御変数	略	範囲
1	\vec{v} の x_b 成分	U_0	22~27m/s
2	\vec{v} の z_b 成分	W_0	1~4 m/s
3	初期ピッチ角	θ_0	-11~-8°
4	初期角速度 (= $\dot{\theta}_0$)	Q_0	-30~10°/s
5	β の制御点 @0.3秒	β_0	0~40°
6	β の制御点 @1.3秒	β_1	0~40°
7	β の制御点 @2.3秒	β_2	0~40°
8	β の制御点 @3.3秒	β_3	0~40°
9	β の制御点 @4.3秒	β_4	0~40°
10	β の制御点 @5.3秒	β_5	0~40°
11	β の制御点 @6.3秒	β_6	0~40°
12	λ の制御点 @0.3秒	λ_0	0~30°
13	λ の制御点 @1.3秒	λ_1	0~30°
14	λ の制御点 @2.3秒	λ_2	0~30°
15	λ の制御点 @3.3秒	λ_3	0~30°
16	λ の制御点 @4.3秒	λ_4	0~30°
17	λ の制御点 @5.3秒	λ_5	0~30°
18	λ の制御点 @6.3秒	λ_6	0~30°

表2 拘束条件

拘束条件	物理的意味
$g_1=27-V_0^2>0$, V_0 : 初速度	初速度は 27m/s 以下.
$g_2=\alpha>0$	迎え角 α は正.
$g_3=40-\alpha>0$	迎え角 α は 40°より小.
$g_4=FD-130>0$, FD : 飛距離	飛距離は 130m より大.

5.2 制御変数

18 個の制御変数を表 1 に示した. 制御範囲もあわせて記述してある. 全て, ジャンパが飛翔中に制御可能な変数である. これらの変数を手作業で変えつつ, 目的関数 F_1 と F_2 を同時に最小化することは, 極めて困難である. そこで, ARGGA を使用した. 制御変数 1~5, 12 は, 初期条件, つまり $t=0.3$ 秒における各変数である. 制御変数 5~18 は, 前傾角 β とスキー V 字開き角 λ の制御点である. それぞれの 1 点目 (β_0 & λ_0) は, $t=0.3$ 秒における制御点の値, 2 点目は $t=1.3$ 秒における制御点の値, ..., 7 点目は $t=6.3$ 秒における制御点の値である. これらの制御点を 3 次の C スプラインで補間し, 時々刻々の $\beta(t)$ と $\lambda(t)$ の値を与えた.

5.3 拘束条件

4 つの拘束条件を表 2 に示した. 実際的な範囲であること, 実験で空気力が得られている範囲であること, を考慮し, 拘束条件の範囲を決めた.

6. 結果

以下に最適化結果を示す. 図 3 の横軸は F_1 , 縦軸は F_2 である. F_1 は絶対値が大きいほど良く, F_2 は小さいほど良いが, 両目的関数が同時に最適になることは無かった. 飛距離のみを重視すれば, 163 m の飛翔も可能であるが, 前傾角 β の分散が増大する (安定性が失われる). 一方, 安定性を重視すれば, 飛距離は短くなってしまふ. 望ましい解は, 両目的関数間にトレードオフのあるパレート解となった.

図 3 の左上端と右下端のパレート最適解, つまり飛距離最長と安定性最大の 2 つの極限最適解の飛翔軌跡を図 4 と 5 に示した. 飛距離最大の場合が図 4, 安定性最大の場合が図 5 である. 下の実線が大倉山ジャンプ台の斜面をあらわし, その上の実線が重心の飛翔軌跡, さらに横から見たジャンパの姿勢と上から見た V 字開き角を示している. 両者を比べると, 前者

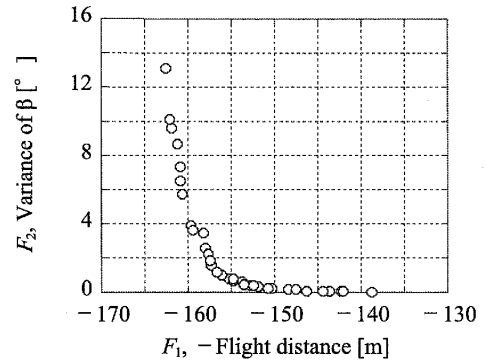


図3 両目的関数のトレードオフ

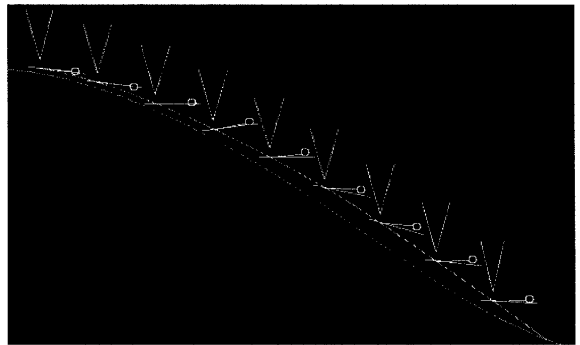


図4 飛翔軌跡. 飛距離最長の場合

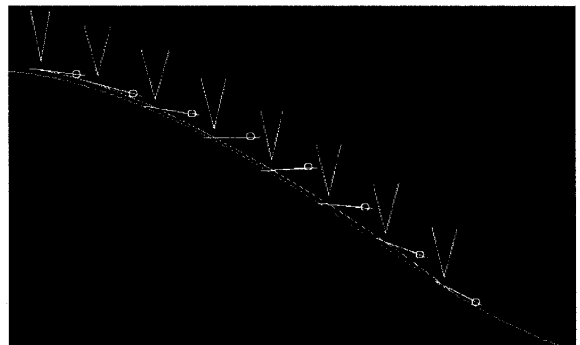
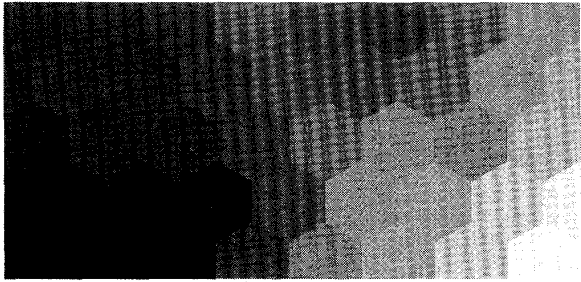


図5 飛翔軌跡. 前傾角の分散が最小の場合

(図 4) の V 字開き角は, 踏切直後から着地前まで大きく保たれているが, 後者 (図 5) のそれは, 踏切直後にはやや小さい. また, 前者 (図 4) の前傾角 β は中盤から後半にかけて, やや大きくなるが, 後者 (図 5) のそれは飛翔中, $\beta=0$ で, 一枚板の姿勢である.

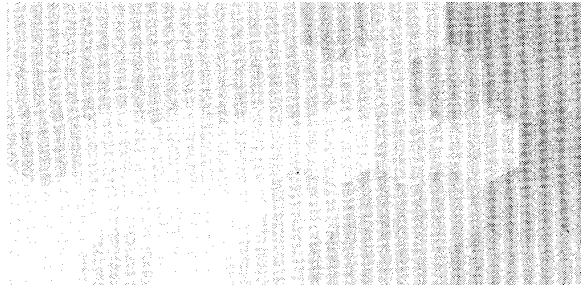
次にパレート解空間を図 6 の自己組織化マップ (SOM: Self-Organizing Map) [6] で示す. SOM は, 多次元情報を 2 次元平面にマップとして描くことができる. ここではデータマイニングツールとして, 利用した [7]. これにより, 2 つの極限最適解のみではなく, 最適解空間全体を知ることができる. 黒色が表 1



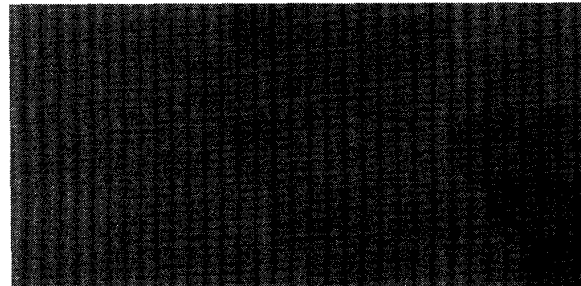
(a) F_1 : 飛距離 $\times -1$



(b) F_2 : 前傾角 β の分散



(c) θ_0 : 初期ピッチ角 @0.3 秒



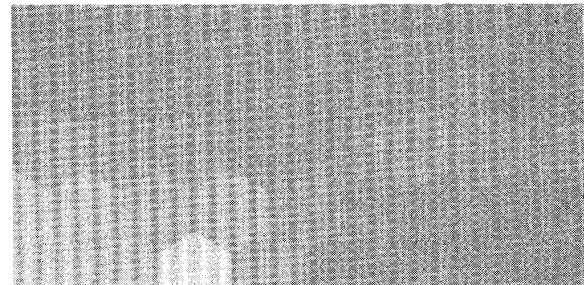
(d) Q_0 : 初期頭上げの角速度 @0.3 秒



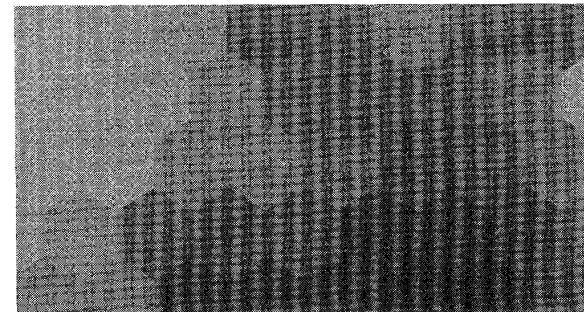
(e) β_0 : 初期前傾角 @0.3 秒



(f) β_4 : 前傾角 @4.3 秒



(g) λ_0 : 初期スキー V 字開き角 @0.3 秒



(h) λ_4 : スキー V 字開き角 @4.3 秒

図 6 目的関数と制御変数の自己組織化マップ

で示した制御範囲の最小値，白色が同じく最大値を示している。例えば， F_1 (図 6(a)) が最小（飛距離最長）となるのは，マップの一番左，下から 2 番目の位置である。その位置は， F_2 (図 6(b)) が最大となる位置である。一方， F_1 が大きくなるのは，マップの右下付近で，そこは F_2 が最小となる位置で，トレードオフを確認できる。次に制御変数の SOM を見ると，以下をよみとることができる。

- 初期ピッチ角 θ_0 (図 6(c)) は，全てのパレート解に対して，制御範囲で最大の -8° (SOM の全域が白)。
- 初期の頭上げ（下げ）の角速度 Q_0 (図 6(d)) は，

全てのパレート解に対して，負の値，つまり頭下げの角速度。

- 初期の前傾角 β_0 (図 6(e)) は，全てのパレート解に対して，ほぼ 0° (SOM の全域が黒)，つまり体とスキー板が同一平面内にある一枚板姿勢。
- F_1 を小さくする（マップの左下），つまり飛距離を長くするならば， $Q_0 = -17^\circ/\text{s}$ (図 6(d))， $\beta_4 = 8^\circ$ (図 6(g))， $\lambda_0 = 28^\circ$ (図 6(g))， $\lambda_4 = 27^\circ$ (図 6(h))。
- F_2 を小さくする（マップの右下）ならば， Q_0

$= -28^\circ/\text{s}$, $\beta_4=1^\circ$, $\lambda_0=19^\circ$, $\lambda_4=23^\circ$ (図 6(h)).

7. おわりに—今後の課題—

今後の課題を2つあげる。一つはコンカレント（同時，並行）最適化，もう一つは目的関数の数値化である。

我々は，スキージャンプの飛翔局面に関して，最適化を行った。その結果，V字スキー開き角の最適制御法は，ワールドカップチャンピオンのアダム・マリッシュ選手のそれと定性的に一致[8]していた。しかし，この結果は，風洞実験に使用したスキー板やジャンプスーツに合った最適スキルである。スキー板の剛性（板のしなりや振動に影響する）やジャンプスーツの通気量が変われば，最適スキルも変わる。そこで，今後は，用具もスキルと並列に取り扱い，コンカレントに最適化する必要がある。用具とスキルがコンカレントに最適化されると，競技力はさらに向上するはずである。

また，きれい，気持ちいい，といった感性に関する量をシミュレーション可能な物理量に変換する点が研究者の腕の見せ所である。1つ1つの対象に対して，丁寧な観察と洞察力によって，この変換作業を行うしかない，というのが現状である。

謝辞 本研究は，科学研究費補助金（基盤研究（A）No. 23240090）の助成を受けた。感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 嘉納秀明, 『システムの最適理論と最適化』, コロナ社, 1992.
- [2] Deb, K., "Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms," John Wiley & Sons, Chichester, 2001.
- [3] Sasaki, D. and Obayashi, S., "Efficient Search for Trade-Offs by Adaptive Range Multi-Objective Genetic Algorithms," *AIAA Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 2 (2005), 44-64.
- [4] 古野高俊, 『ジャンプが10倍楽しめる観戦ガイドブック』, マイクロウェーブ, 1998.
- [5] Seo, K., Watanabe, I. and Murakami, M., "Aerodynamic force data for a V-style ski jumping flight," *Sports Engineering*, 7 (2004), 31-39.
- [6] Kohonen, T., "Self-Organizing Maps," Springer, Berlin, Heidelberg, 1995.
- [7] 大林茂, 航空機設計空間の見える化, 可視化情報, 31 (2011), 48-53.
- [8] Seo, K., Murakami, M. and Yoshida, K., "Optimal flight of a V-style ski jumping," *Sports Engineering*, 7 (2004), 97-103.