

# 単峰性正規分布交叉を用いた実数値遺伝的アルゴリズムによる 宇宙探査機の多重重力支援軌道最適化

田中一真\*, 棟朝雅晴\*\*, 赤間清\*\*\*

北海道大学大学院情報科学研究科\*

北海道大学情報基盤センター\*\*, \*\*\*

## 1. 概要

複数天体の重力支援を利用した宇宙探査機の軌道最適化は、厳密解の発見が困難な、制約付き非線形多変数関数の最適化問題である。本研究では、ESA(欧州宇宙機関)で公開されている軌道最適化問題を UNDX(unimodal normal distribution crossover, 単峰性正規分布交叉)を用いた GA(実数値遺伝的アルゴリズム)によって解く。

## 2. 軌道最適化問題 Cassini2

ESA の Web サイトでは、運用技術研究者や航空宇宙技術者向けにブラックボックス関数形式の軌道最適化問題を公開している。

その中で今回扱う Cassini2 では、地球から出発した探査機が、順に、金星、金星、地球、木星の重力を利用したスイングバイ航行によって土星に辿り着く際(図 1)、軌道調整に必要な速度変化の累積量  $dv$ (km/sec)を評価関数として最小化する。 $dv$  の値が小さいほど、探査機に必要な推進剤の量が減らせる事になる。

22 個の変数(表 1)を持つ Cassini2 は、数学的には、厳密解の発見が困難な、制約付き非線形多変数関数の最適化問題であるといえる。

- 0. 地球打ち上げ
- 1. 金星スイングバイ
- 2. 金星スイングバイ
- 3. 地球スイングバイ
- 4. 木星スイングバイ
- 5. 土星到着

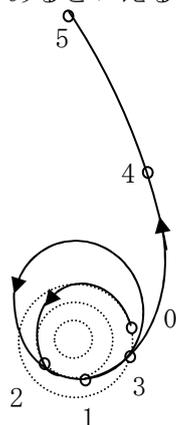


図 1. Cassini2 の軌道

変数	下限	上限	単位
t0	-1000	0	MJD2000
Vinf	3	5	km/sec
u	0	1	n/a
v	0	1	n/a
T1	100	400	days
T2	100	500	days
T3	30	300	days
T4	400	1600	days
T5	800	2200	days
eta1	0.01	0.09	n/a
eta2	0.01	0.09	n/a
eta3	0.1	0.9	n/a
eta4	0.1	0.9	n/a
eta5	0.1	0.9	n/a
r_p1	1.05	6	n/a
r_p2	1.05	6	n/a
r_p3	1.15	6.5	n/a
r_p4	1.7	291	n/a
b_incl1	-pi	pi	rad
b_incl2	-pi	pi	rad
b_incl3	-pi	pi	rad
b_incl4	-pi	pi	rad

表 1. Cassini2 の変数

## 3. 交叉手法 UNDX

UNDX は、実数値空間上の 2 つの親個体を結ぶ線分の周辺に、標準偏差が 3 つめの親個体との距離に依存する正規分布に従って、子個体を生成する GA の交叉手法である(図 2)。

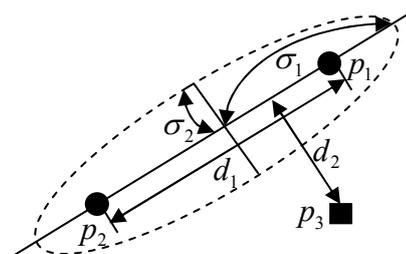


図 2. UNDX の概要

次の式によって子個体  $c_1, c_2$  を生成する。

Tragectory Optimization of Space Mission using UNDX  
 \*Kazuma Tanaka(Graduate School of information Science and Technology,Hokkaido University)  
 \*\*Masaharu Munetomo(Hokkaido University Information initiative Center)  
 \*\*\*Kiyoshi Akama(Hokkaido University Information initiative Center)

$$e_1 = \frac{p_2 - p_1}{|p_2 - p_1|}, \quad e_1 \perp e_j (i \neq j), (i, j = 1, \dots, n)$$

$$z_1 \sim N(0, \sigma_1^2), \quad z_k \sim N(0, \sigma_2^2), (k = 2, \dots, n)$$

$$\sigma_1 = \alpha d_1, \sigma_2 = \frac{\beta d_2}{\sqrt{n}}$$

$$m = \frac{p_1 + p_2}{2}$$

$$c_1 = m + \sum_{k=1}^n z_k e_k, c_2 = m - \sum_{k=1}^n z_k e_k$$

ここで、 $p_1, p_2$  を線分を結ぶ両親となる親個体、 $p_3$  を正規分布の標準偏差を定める親個体、 $e_1$  を  $p_1$  と  $p_2$  を結ぶ軸方向の単位ベクトル、 $n$  を次元数、 $z_1 \sim N(0, \sigma_1^2), z_k \sim N(0, \sigma_2^2)$  を平均 0 標準偏差  $\sigma$  となる正規乱数、 $d_1$  を  $p_1$  と  $p_2$  の間の距離、 $d_2$  は  $p_1, p_2$  を結ぶ軸と  $p_3$  の距離、 $\alpha, \beta$  をユーザーが与える制御パラメータである。

最適化問題において、良い解は良い親の周辺に存在する可能性が高いと考えられる。特に変数間に依存関係がある最適化問題では、解を改善するには同時に複数の変数を変化させる必要がある為、座標軸に平行でない方向の領域に沿って存在することが多い。探索が十分進み、解が収束しつつある時の良い親同士を結ぶ線分がその領域であるといえる。

UNDX を用いた GA は、多様な解が存在し親個体同士が離れている探索前期には広範囲に、解が収束しつつある探索後期には、良い解が存在しそうな狭い範囲に子を生成する為、効率の良い探索を行えると考えられる。

#### 参考文献

1) 小野 功, 佐藤 浩, 小林 重信; 単峰性正規分布交叉 UNDX を用いた実数値 GA による関数最適化

2) ESA;

<http://www.esa.int/ESA;2013/01/11>