

複数着陸機による月極域探査の進化計算による着陸地点検討

鎌田 一樹[†], 加藤 拓也[†], 小野 功[†],
井上 博夏^{††}, 山本 光生^{††}, 大山 聖^{††}, 大嶽 久志^{††}

東京工業大学情報理工学院[†], 宇宙航空研究開発機構^{††}

1 はじめに

月最適着陸地点の探索問題は、着陸可能であるという制約のもと、月極域探査における活動のための日照を最大化する地点を探索する最適化問題である。月極域において、単地点で得られる日照は最大でも年間で85%程度であることが知られており、1年間の活動においては、連続して3日間以上日陰となる期間が存在してしまう。そこで、複数の着陸機を利用し、活動のための日照を複数の地点で確保、無線伝送により共有し合うことで、単機の着陸機では実現できなかった様々な地点で長期間の探査が可能になる。

複数機の月最適着陸地点の探索問題は、単機の場合と比較し、最適化が困難な問題となる。まず、複数機では着陸候補地点の組合せが爆発的に増加し、人手による探索は困難となる。加えて、着陸機間の無線伝送のための通信可視性が新たな制約条件として加わり、通信可視性の判定にはシミュレーションを伴うことから、数理計画法などの解析的な手法は適用が困難となる。本問題のような、シミュレーションを伴う最適化において有力な枠組みの一つとして、進化計算手法がある。

進化計算手法は、与えられた目的関数の最適解を試行錯誤的に発見するアルゴリズムである。代表的な進化計算手法として、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms)¹⁾ や進化戦略 (Evolution Strategies)²⁾ が存在する。実問題における進化計算手法の活用例では、新幹線のノーズフロント設

計³⁾ や航空機の主翼設計⁴⁾ などがある。しかしながら、複数機の月最適着陸地点の探索問題における着陸機間の通信可視性の確保は非常に強い制約条件であり、探索空間に微小な実行可能領域が多数存在する景観となるため、既存の多くの進化計算手法では探索が困難である。そこで、本論文では制約条件の強い問題に対しても有用な進化計算手法であるクラスタリングベースの有望個体囲い込み法 (Clustering-based Promising Individual Enclosure, CPIE)^{5, 6)} を探索に用いる。

本論文は、複数機月最適着陸地点の探索問題に進化計算手法CPIEを適用し、有望な着陸地点を発見することを目的とする。実験では、人手により発見された既知の有力地点よりも優れる地点がCPIEにより発見されることを確認する。

2 複数機月最適着陸地点の探索問題

本論文における月最適着陸地点の探索問題は、月極域において2, 3機の着陸機を組合せて得られる活動のための日照を最大化する問題として定義される。2, 3機の着陸機間で活動のための電力を伝送し合うことにより、単機の月最適着陸地点の探索⁷⁾ では実現することのできなかった長期間の探査期間を確保しつつ、複数の地点の同時探査が可能になると期待される。

本問題の設計変数は、 9111×9111 点の月極域における2次元座標となる。したがって、2機では4次元、3機では6次元の設計変数を有する問題となる。 9111×9111 点の各座標ごとに傾斜角度・標高・3時間区切り3年間の日照時系列データを有し、データの解像度は1地点あたり 40m^2 である。

本問題の評価値には、日照率・連続日照期間・連続日陰期間の3種類が存在する。日照率は3年間で日照が存在する時刻の割合を表す。連続日照期間は3年間のうち連続して日照が存在する最大の期間を表す。連続日陰期間は1年以上の連続日照期間を得るために無視する必要がある最大

Examination of Landing Sites for Multi-Lunar-Lander Using Evolutionary Computation

[†] Kazuki Kamata(kamata.k@ic.dis.titech.ac.jp)

[†] Takuya Kato(kato.t@ic.dis.titech.ac.jp)

[†] Isao Ono(isao@c.titech.ac.jp)

^{††} Hiroka Inoue(inoue.hiroka@jaxa.jp)

^{††} Mitsuo Yamamoto(yamamoto.mitsuo@jaxa.jp)

^{††} Akira Oyama(oyama@flab.isas.jaxa.jp)

^{††} Hisashi Otake(ootake.hisashi@jaxa.jp)

School of Computation, Tokyo Institute of Technology ([†])

Japan Aerospace Exploration Agency (^{††})

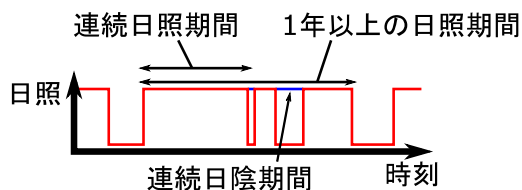


Fig. 1 連続日照期間と連続日陰期間の例.

Table 1 人手により発見された既知有力地点の単地点における各評価値.

地点名	日照率(%)	連続日照期間(day)	連続日陰期間(hour)
地点A	84.14	202.750	312
地点B	71.19	25.375	273
地点C	79.09	29.250	138
地点D	63.80	24.250	333
地点E	63.65	21.750	315
地点F	61.66	23.375	297
地点G	69.90	84.375	384
地点H	60.79	21.875	351
地点I	84.36	147.250	132
地点J	85.17	117.625	72
地点K	68.45	88.000	498
地点L	83.39	146.125	309

の日陰期間を表し、着陸機に搭載すべきバッテリー容量に相当する．連続日照期間および連続日陰期間の例をFig. 1に示す．2, 3機の組合せにおける各指標は、Fig. 2のように複数地点における日照の時系列データの和を求め算出される．日照率および連続日照期間は最大化、連続日陰期間は最小化すべき評価値となる．

本問題における制約条件には、着陸地点の傾斜角、着陸機間の通信可視性、着陸機間の距離の3つが存在する．着陸地点の傾斜角は、全ての着陸機の着陸地点が着陸可能な傾斜である場合に満たされる条件である．着陸機間の通信可視性は、着陸機間に山などの電力伝送を阻害する地形がない場合に満たされる条件である．着陸機間の距離は、無線伝送による減衰を考慮し、通信を行う着陸機間の距離が100km以内である場合に満たされる条件である．

2.1 既知有力地点

本問題では、既に人手により12地点の有力な地点とその組合せが発見されている．人手により発見された12地点を有力地点と呼び、それぞれを地点A, 地点B, ..., 地点Lと表すこととする．各有力地点における評価値をTable 1に示す．

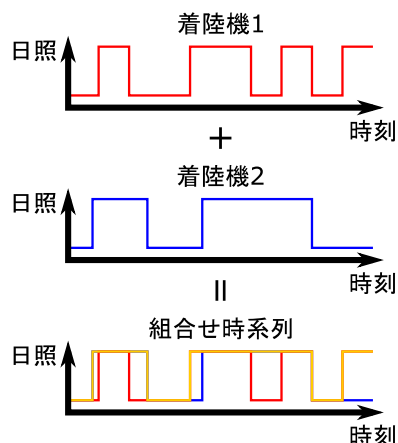


Fig. 2 2機の着陸機による組合せの日照の時系列データの例．縦軸は日照が存在するか否かの2値を表し、横軸は時刻を表す．赤線と青線はそれぞれ別の地点の着陸機の日照の時系列データを表しており、黄線は組合せの日照の時系列データとなる．

3 CPIEによる複数機月最適着陸地点の探索

本論文では、人手により発見されている既知有力地点を探索の手がかりとしつつ、さらに優れる組合せを発見するために、CPIEにおける初期解集合の生成方法を工夫する．具体的には、1つの着陸機を既知の12個の有力地点の近傍に設定し、その他の着陸機は制約条件を満たす地点からランダムに設定することで初期個体集合を生成する．これにより、有力地点の情報を活用しつつ、人手では考慮されていなかった組合せの探索が可能となり、より良い組合せを発見することが期待される．なお、CPIEの詳細のアルゴリズムについては文献⁶⁾を参照されたい．

本論文では、以下の手順にしたがってCPIEの初期解集合を生成する．2機の着陸機の場合は手順1, 2により初期解集合を生成し、3機の着陸機の場合は手順1-3により初期解集合を生成する．

1. 1つ目の着陸機を選択した既知有力地点の半径400m以内かつ傾斜の制約条件を満たす地点に一樣ランダムにサンプルする．
2. 2つ目の着陸機を1つ目の着陸機から50km以内かつ通信可視性を含む制約条件を満たす地点に一樣ランダムにサンプルする．
3. 3つ目の着陸機を2つ目の着陸機から50km以内かつ通信可視性を含む制約条件を満たす地点に一樣ランダムにサンプルする．

ここで、選択した既知有力地点には地点Aから地点Lまでの12地点について、実験ごとに1地点だけを選択する。人手により発見されているそれぞれの既知有力地点の周辺について集中的に探索を行うことで、さらに有用な地点が発見されることを期待する。

4 実験

3章の初期個体生成方法を用いたCPIEを月最適着陸地点の探索問題に適用し、人手による既知有力地点同士の組合せよりも優れる組合せの発見を目的とした実験を行う。

4.1 設定

3章の初期個体生成方法を用いたCPIEを、選択する有力地点を地点Aから地点Lとした12通りに対し、2機、3機の組合せの探索をそれぞれ50試行ずつ適用する。なお、CPIEによる探索時は、組合せ日照率の最大化を目的関数とする。CPIEの終了条件は評価回数が 10^6 回に達した場合とする。

4.2 結果

2機、3機の組合せにCPIEを適用した結果、各評価値が最良となる組合せにおける各評価値および着陸機間距離をTable 2およびTable 3に示す。Table 2, Table 3には、比較のため、人手による既知有力地点同士の組合せと、4.3節の考察に用いる日照率70%以上の地点の全組合せ探索における最良の組合せの結果も示している。

CPIEによって発見された組合せと人手による既知有力地点同士の組合せを比較すると、2機の組合せでは、日照率を1.07%、連続日陰時間を6時間改善する地点が発見された。3機の組合せでは、日照率を1.13%、連続日照期間を25日と6時間、連続日陰期間を30時間改善する50km以内の地点が発見された。100km以内ならば、さらに日照率を0.3%、連続日照期間を57日と15時間、連続日陰期間を6時間改善する地点が発見された。

4.3 考察

CPIEによって発見された組合せの有用性を検討するために、単地点の日照率が70%以上となる地点の全組合せ探索を考察実験として行う。なお、日照率が70%以上となる地点は合計593地点であるため、3機の組合せでも約3,400万通りであり、全組合せ探索は十分に可能である。日照率70%以上の地点の全組合せ探索における最良の組合せの結果をTable 2, Table 3に示す。

CPIEによる探索と日照率70%以上の地点の全組合せ探索を比較すると、2機の組合せにおいては同等の組合せ日照率および連続日陰期間となる地点を発見し、3機の組合せにおいては50km以内では同等、100km以内では全ての評価値を改善する組合せを発見できている。以上の結果から、単地点の日照率が優れる地点同士の組合せと比較しても、CPIEはさらに優れる地点を獲得できたことを示唆している。

各組合せを構成する地点のついても考察する。Table 2, Table 3における組合せを構成する単地点の日照率をTable 4に示す。CPIEにより発見された組合せを構成する単地点の日照率に着目すると、いずれの組合せにおいても単地点の日照率が70%未満となる地点が含まれている。特に、3機の組合せを構成する地点では、単地点の日照率が49.61%、33.38%となる地点が含まれている。これらの地点は人手による探索では考慮されていなかった地点であり、CPIEによって全く新しい有望な地点の組合せが得られたことを示唆している。

5 おわりに

本論文では、進化計算手法CPIEを用いた複数機月最適着陸地点の探索を行い、人手による探索および単地点の日照率に優れる地点の全組合せ探索よりも優れる組合せ地点を発見した。CPIEにより発見された地点は、人手による探索と比較して、2機の組合せでは日照率を1.07%、連続日陰期間を6時間改善し、3機の組合せでは日照率を1.43%、連続日照期間を82日と21時間、連続日陰期間を36時間改善する組合せ地点が得られた。また、CPIEにより発見された3機の組合せでは、単地点の日照率が49.61%および33.38%という人手による探索では考慮されないような日照率の悪い地点が含まれていた。以上の結果から、CPIEを用いることによって、人手による探索よりも広い領域を探索しつつ、さらに優れた組合せの発見に成功したと考えられる。

今後の展望として、日照以外の評価項目も考慮した有力地点の探索や、着陸機を4機に増やした組合せにおける有望な地点の探索などが挙げられる。

参考文献

- 1) L. Davis. Handbook of genetic algorithms. Van Nostrand Reinhold. 1991.

Table 2 2機の着陸地点探索問題において各手法が発見した各評価値の最良値と着陸機間距離. 太字は全手法を比較した各評価値における最良値を表す.

手法	日照率(%)	連続日照期間(day)	連続日陰期間(hour)	距離(km)	備考
進化計算手法 CPIEによる探索	97.58	259.750	39	42.46	日照率・連続日照期間の最良 (地点2-A-1, 地点2-A-2)
	96.69	236.125	36	41.83	連続日陰期間の最良 (地点2-J-1, 地点2-J-2)
人手による既知 有力地点の組合せ	96.51	257.625	42	40.82	日照率・連続日陰期間の最良 (地点B, 地点I)
	95.16	259.750	126	42.29	連続日照期間の最良 (地点A, 地点L)
日照率70%以上の 地点の全組合せ	97.58	259.750	39	42.42	日照率の最良 (地点2-1-1, 地点2-1-2)
	95.91	259.875	81	42.08	連続日照期間の最良 (地点2-2-1, 地点2-2-2)
	97.48	258.500	36	40.61	連続日陰期間の最良 (地点2-3-1, 地点2-3-1)

Table 3 3機の着陸地点探索問題において各手法が発見した各評価値の最良値と着陸機間距離. 太字は全手法を比較した各評価値における最良値を表す.

手法	日照率(%)	連続日照期間(day)	連続日陰期間(hour)	距離(km)	備考
進化計算手法 CPIEによる探索	99.62	294.000	9	41.40	50km以内の最良 (地点3-B-1, 地点3-B-2, 地点3-B-3)
	99.92	352.750	3	98.05	100km以内の最良 (地点3-L-1, 地点3-L-2, 地点3-L-3)
人手による既知 有力地点の組合せ	98.49	265.750	39	42.28	既知有力地点の最良の組合せ (地点B, 地点J, 地点L)
日照率70%以上の 地点の全組合せ	99.62	294.000	9	41.77	日照率・連続日陰期間の最良 (地点3-1-1, 地点3-1-2, 地点3-1-3)
	99.59	295.125	12	40.63	連続日照期間の最良 (地点3-2-1, 地点3-2-2, 地点3-2-3)

- 2) T. Bäck. Evolutionary algorithms in theory and practice. 1996.
- 3) 坂上啓. N700系新幹線電車とその省エネルギー効果について. 精密工学会誌, vol. 76, no. 1, pp. 41-45, 2010.
- 4) 大林茂. 航空機の多目的最適設計. 人工知能学会誌. vol. 18, no. 5, pp. 495-501, 2003.
- 5) 戸田淳, 小野功. 有望領域の非連結性に着目した有望個体囲い込み法による大域的多峰性関数最適化. 第12回進化計算学会研究会資料集. pp. 89-96, 2017.
- 6) 青木勇輔, 小野功. 非明示制約付き大域的多峰性ブラックボックス関数最適化のための進化計算手法. 第61回システム工学部会研究会講演論文集. pp. 77-85, 2019.
- 7) 大山聖, 福本浩章, 立川智章. 月着陸最適候補地点の選定問題に基づく最適化ベンチマーク問題の提案. 進化計算学会研究会講演論文集. pp. 33-37, 2019.

Table 4 Table 2およびTable 3の組合せを構成する単地点における日照率. 太字は単地点の日照率が70%未満である地点を表す.

地点名	日照率(%)	地点名	日照率(%)
地点2-A-1	84.10	地点3-B-1	83.26
地点2-A-2	65.10	地点3-B-2	86.14
地点2-J-1	65.90	地点3-B-3	49.61
地点2-J-2	83.26	地点3-L-1	67.31
		地点3-L-2	33.38
		地点3-L-3	81.87
地点2-1-1	84.10	地点3-1-1	83.26
地点2-1-2	70.83	地点3-1-2	86.14
地点2-2-1	78.85	地点3-1-3	72.23
地点2-2-2	83.39	地点3-2-1	83.26
地点2-3-1	83.26	地点3-2-2	82.36
地点2-3-2	79.82	地点3-2-3	72.23