

ABSTRACT

The purpose of this research is to provide a method for analyzing the operations of logistics carriers in making dynamic resource allocations in high-mobility explorations on the lunar surface. A previous paper described Lagrangian Decomposition and Coordination (LDC) method and its application to the logistics carrier operations planning using a one-dimensional model in a logistics network on the lunar surface. This paper describes the expansion of the LDC formulation from one-dimensional to two-dimensional and application of the method to the control of distributed life support systems for high-mobility exploration. A two-dimensional Dynamic Programming (2DP) method is developed to yield exact solutions of the partial problems, and the capability of the algorithm is confirmed by the numerical simulations.

Key words: Logistics Network, Oxygen Supply System, Dynamic Programming

1. はじめに

アポロ計画の教訓では、月面での移動が有人探査の効率を向上させる要であるとされている¹⁾。近年、発表されている有人月面探査計画では、月面拠点の周辺を数百キロ程度の広域にわたって無人や有人のローバを利用して移動しながら探査することが計画されている²⁾。このような有人月面探査においては無人の物資運搬装置と有人の与圧ローバを組み合わせて運用することで広域の遠征をより安全に行うことが可能になる。このとき生命維持システムや生命維持に必要な物資は一拠点ではなく、ある範囲に分散して利用される。このような生命維持システムや物資の配置が大規模になってくると、物資の運搬を行うロジスティクスネットワークの構築と運用が重要になる。

前報³⁾では、月面での1次元モデルの物資運搬装置運用計画へのラグランジュ分解調整法の適用について報告した。本論文では、2次元モデルの物資運搬装置運用計画に本手法を拡張し、高機動型の有人月面探査のための分散型生命維持システムへの適用について検討する。この物資運搬装置運用計画の部分問題の厳密解法として2変数ダイナミックプログラミングを提案し、物資運搬装置の運用期間と移動範囲に対する本アルゴリズムの対応能力について数値計算により確認する。

2. ロジスティクスネットワークの定式化

本章では、Fig. 1に示すように与圧ローバや物資運搬装置の移動モデルを定式化する。最適化する目的関数は、移動コスト、与圧ローバ*i*の居住モジュールからの距離と物資充足率の積からなる補給コスト、物資運搬装置*k*の居住モジュールからの距離と物資充足率の積からなる補給コストの3項の和と定義する。まず、この制約条件付き最適化問題を、ラグランジュ乗数 λ を用いて制約なし最適化問題に置き換える。次に、この最適化問題を物資運搬装置別に分離する。分離可能な元の最適化問題を解くことは、物資運搬装置*k*に関する式(1)一式(6)で表される部分問題を、それぞれ独立に最小化することと同じである。ここで l_k は部分問題*k*のラグランジュ関数である。

$$\begin{aligned} \min l_k = & \sum_{t=1}^T \left[\sum_{j=1}^J c_k \sqrt{(\delta_{xt}^k)^2 + (\delta_{yt}^k)^2} \right. \\ & + \sum_i h_i A_{ik} \sqrt{(d_{r_{xi}}/D_{xu})^2 + (d_{r_{yi}}/D_{yu})^2} ((M_{Ui} - m_{it})/M_{Ui}) \\ & \left. + h_k \sqrt{(dc_{xkt}/D_{xu})^2 + (dc_{ykt}/D_{yu})^2} ((M_{Uk} - m_{kt})/M_{Uk}) \right] \\ & + \sum_{t=1}^T \lambda_t \sum_j \delta_{(x,y)jt}^k B_{(x,y)jk} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{subject to } & dc_{(x,y)kt,t+1} = dc_{(x,y)kt} + \delta_{(x,y)jt}^k \cdot v_{(x,y)jt}^k \quad \forall j, k, t \quad (2) \\ & dc_{(x,y)kt} \geq D_{(x,y)L} \quad \forall k, t \quad (3) \\ & dc_{(x,y)kt} \leq D_{(x,y)U} \quad \forall k, t \quad (4) \\ & m_{i,t+1} = m_{it} + \Delta m_{it} \quad \forall i, t \quad (5) \\ & m_{k,t+1} = m_{kt} + \Delta m_{kt} \quad \forall k, t \quad (6) \end{aligned}$$

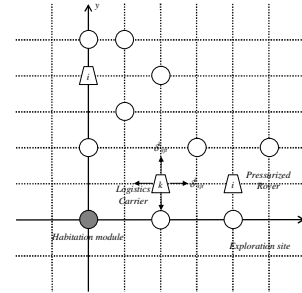


Fig. 1 ロジスティクスネットワークの概念と移動モデル

決定変数 δ_{xjt}^k と δ_{yjt}^k は、物資運搬装置*k*の移動*j*を*x*, *y*軸方向に時刻*t*で行う動作 (-1: 後進, 0: 停止, 1: 前進)を示す。つまりこの2つの決定変数を組み合わせた9つの移動先(右、右上、上、左上、左、左下、下、右下、停止)を持つ。 c_k は物資運搬装置*k*の単位当たりの移動コスト、 h_i はローバ*i*の単位当たりの補給コスト、 h_k は物資運搬装置*k*の単位当たりの補給コスト、 A_{ik} は与圧ローバ*i*と物資運搬装置*k*の関係を示す0-1行列、 $d_{r_{xij}}$ は居住モジュールからの与圧ローバ*i*の位置、 $D_{(x,y)U}$ は物資運搬装置の位置上限、 M_{Ui} は与圧ローバ*i*の物資量上限、 m_{it} , Δm_{it} は与圧ローバ*i*の物資量と物資変化量、 $dc_{(x,y)kt}$ は物資運搬装置*k*の位置、 M_{Uk} は物資運搬装置*k*の物資量上限、 m_{kt} , Δm_{kt} は物資運搬装置*k*の物資量と物資変化量をそれぞれ示す。 $B_{(x,y)jk}$ は移動*j*と物資運搬装置*k*の関係を示す0-1行列である。制約条件は、物資運搬装置*k*の位置 $dc_{(x,y)kt}$ に関する式(2)、物資運搬装置の位置の下限 $D_{(x,y)L}$ と上限 $D_{(x,y)U}$ に関する式(3)、式(4)、与圧ローバ*i*の時刻*t*の物資量 m_{it} に関する式(5)、物資運搬装置*k*の時刻*t*の物資量 m_{kt} に関する式(6)からなる。

3. 物資運搬装置の運用計画

本計算では、Fig. 2に示す月面拠点の生命維持システムの酸素配分問題を解く。これは居住モジュール1基、物資運搬装置1台($k=1$)、与圧ローバ2台の4つの要素からなる。物資の補給は、居住モジュールから物資運搬装置(sw_1)、居住モジュールから与圧ローバ1(sw_2)、2(sw_3)、物資運搬装置から与圧ローバ1(sw_4)、2(sw_5)への

5 系統あり、それぞれが同一位置に存在するときに補給可能である。計算単位には距離[days]、酸素量[CM-days]を導入する。距離[days]は1日で移動可能な距離、酸素量[CM-days]は1名のクルーが1日に必要な酸素量を意味する。ここでは距離[days]の1単位を50km、酸素量[CM-days]の1単位を1kgに設定する。

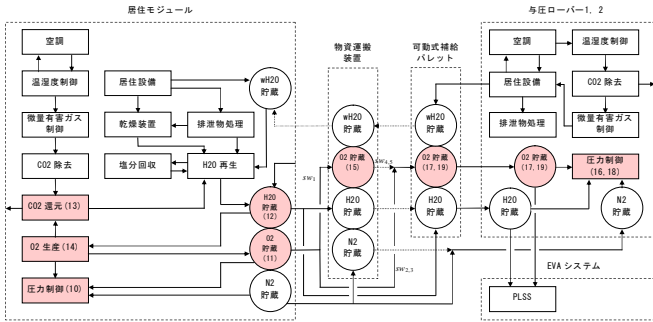


Fig. 2 月面拠点の生命維持システム

居住モジュールには4人滞在可能であり、その4人がそれぞれ2人乗り与圧ローバ2台で同時に28日間の遠征を行う。それぞれの与圧ローバは2人分14日間の必要物資を輸送可能である。28日間の遠征の場合には、残りの2人分14日間の物資を物資運搬装置により供給する。このとき居住モジュールではO₂生産装置によりO₂の生産を行う。CO₂還元は、居住モジュールでは行いが、遠征中の与圧ローバでは行わない。ただし、本計算では、居住モジュールでの滞在時間が短いためクルーが居住モジュールに滞在中もCO₂還元装置を稼働していない。

Fig. 3 (b), (c)に示すように与圧ローバ1と2に28日間の探査計画をそれぞれ与え、物資運搬装置の運用計画を求める。この計画では300km x 300kmの範囲で1000km程度の走行を想定している。居住モジュールでは水の再生を行い、与圧ローバでは水の再生を行わず水の回収のみを行い、CO₂の回収を行わない。このときの居住モジュール、物資運搬装置、与圧ローバの初期O₂貯蔵量をそれぞれ14, 56, 28 CM-daysに設定する。

4. 計算結果

移動軌跡

Fig. 3 に28日間の運用における物資運搬装置(Lc)、与圧ローバ1(Lr1)、2(Lr2)のそれぞれの位置をxy座標で示す。Fig. 3 (a)は本手法により求めた物資運搬装置の移動軌跡を示す。Fig. 3 (b),(c)は与圧ローバ1と2に事前に与えられた探査のための移動軌跡である。Fig. 3 (a), (b), (c)のxy座標表示では特定の時刻におけるそれぞれの位置関係が分かりにくいいため、xy座標表示をTime-10x+y表示に変換したグラフをFig. 3 (d)に示す。この図は物資運搬装置が、1日目~5日目、7日目に与圧ローバ2と同じ位置に移動し、11日目と12日目に与圧ローバ1の位置に移動し、15日目には再び与圧ローバ2の位置に移動し、18日目まで追従し補給している。その後、24日目に再補給のために居住モジュールに帰還している。その後26日目にはローバ1と2に再び補給している。

計算量の比較

Fig. 4 に本手法の1変数(AV2-6)と2変数(AV1-6)のメモリ使用量(状態数6の場合)の比較を示す。メモリ使用量(実測値)はダイナミックプログラミングの各段階の計算に使用した2次元配列の行数(常用対数)を用いて表す。1変数を2変数に拡張した場合、 $t=28$ のときAV2-6はAV1-6の1.7倍となり、 $10^{1.7}$ 倍程度のメモリ使用量で計算可能であることがわかる。制約条件を利用して計算量を減らすことでメモリ使用量の指数関数的な増加が発生していないことがわかる。全体のメモリ使用量は各日tのメモリ使用量の和となる。

次に、Fig. 5 にxy座標の状態数を増やした場合(平面の解像度

を高める、もしくは移動範囲を広げる)のメモリ使用量の比較を示す。状態数6に対する状態数8, 10, 12の比のグラフからはxy座標の状態数を6から8, 10, 12に増やした場合のメモリ使用量の増加が $10^{0.23}$, $10^{0.4}$, $10^{0.53}$ 程度であることがわかる。つまり状態数を2, 4, 6と増やしても計算量の指数関数的な増加が発生していない。なお、2変数で状態数が12の場合でも2分以内に計算が終了している。

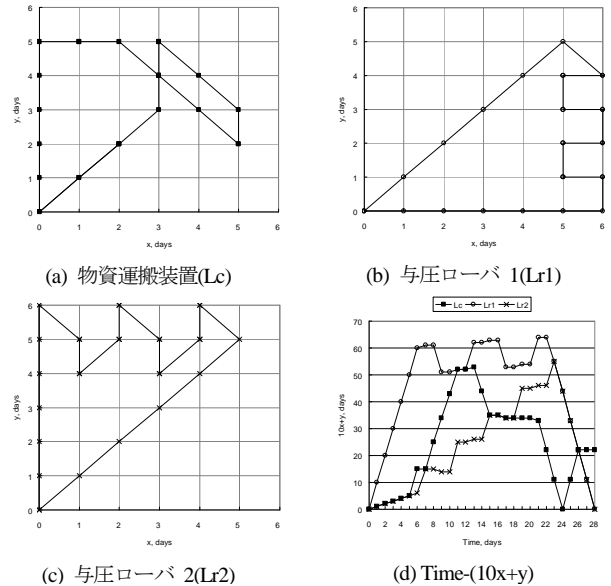


Fig. 3 物資運搬装置(Lc)、与圧ローバ1(Lr1)、2(Lr2)の移動軌跡

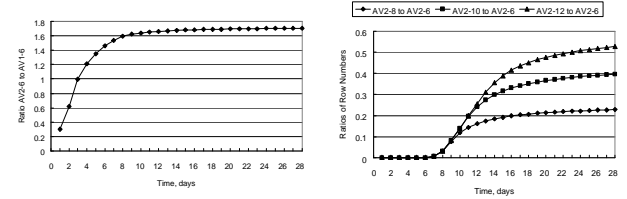


Fig. 4 1変数と2変数のメモリ使用量比較

Fig. 5 xy座標の状態数を増やした場合のメモリ使用量比較

5. まとめ

本論文では、物資運搬装置ごとの部分問題の厳密解法として2変数ダイナミックプログラミングを提案し、運用期間が長くなった場合や移動範囲が広がった場合に計算量が指数関数的には増加しないことを確認した。本手法の特徴はローバの台数の増加に対しては計算量が増えない、そして物資運搬装置の台数の増加に対しては多項式オーダーでしか計算量が増えないことである。これらの特徴と今回確認できた2つの特徴をあわせて考えると、本手法は、ロジスティクスネットワークの規模が大きくなった場合に十分対応できる可能性が高いといえる。

参考文献

1. Bagdigian R. M., Challenges with Deploying and Integrating Environmental Control and Life Support Functions in a Lunar Architecture with High Degrees of Mobility, 2009-01-2481, SAE Technical Paper Series, 2009.
2. Kennedy K. J., Touns L. D., and Rudisill M., Constellation Architecture Team-Lunar Scenario 12.0 Habitation Overview, JSC-CN-19362, 2010, NASA Technical Report Server, cited 10 August 2010.
3. Miyajima H., An Operations Management Method for a Logistics Network of Distributed Life Support Systems on the Lunar Surface, AIAA 2010-6226, 2010.