

広域移動型有人宇宙探査のための分散型生命維持システムの管理

An Operations Management Method of Distributed Life Support Systems for Manned Wide-Area Mobile Space Explorations

○宮嶋宏行（東京女学館大）

Hiroyuki Miyajima*

* Tokyo Jogakkan College, 1105 Tsuruma, Machida, Tokyo 194-0004, Japan

E-mail : miyajima@m.tjk.ac.jp

ABSTRACT

A logistics network is proposed for manned wide-area exploration on the lunar surface. A logistics carrier operation problem has been formulated and solved using Lagrangian decomposition and coordination, developed for operations management of Advanced Life Support Systems. The method can solve operations scheduling problems consisting of two rovers and a logistics carrier, which are then modeled in limited axial movement. This paper describes how to generate an operations schedule for the logistics carrier which is calculated considering both the rover positions and supply possibilities in the logistics network.

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⁾。将来の有人月面探査では、ある地点に着陸後、その周辺を百キロ程度の広域にわたって無人や有人のローバーを利用して移動しながら探査することが予想される。このような探査では、居住モジュール、与圧ローバー、物資運搬装置、現地資源利用(ISRU)システム、船外活動(EVA)システムからなる拠点に滞在しながら、与圧ローバーやEVAシステムを用いて数十キロメートルから百キロメートル離れた地点に遠征しミッションを行う¹⁾。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集中して運用されるわけではなく、ある範囲に分散して運用される。無人の物資運搬装置と有人の与圧ローバーを組み合わせることで広域の遠征をより安全に行うことができる。このように分散している生命維持システムの運用を考える場合には、どの物質をどこで、どのくらいの量、どの物質の形で保持するのが適当であるのかが重要になる。不適切な運用がなされた場合には、月面全体では物資が満たされているが、ある地点では物資が不足する可能性がある。よって月面の広域探査のためには、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。

過去に、筆者は、先端生命維持システムの地上実験施設のために分散型運用システムのシミュレータを開発し、ラグランジュ分解調整法のアルゴリズムを実装した^{2,3)}。本研究では、ロジスティクスネットワークの動的リソース配分を可能にする分散型運用管理アルゴリズムの開発を最終目的とするが、本論文では、月面ロジスティクスネットワーク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する。

2. ロジスティクスネットワーク

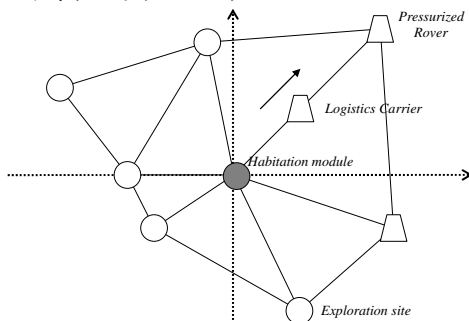


Fig. 1 月面ロジスティクスネットワーク

月面において、有人、無人のローバーを用いて広域探査を行う場合、生命維持に必要な装置や物資が移動可能であり、分散した状態

で運用される。この概念を Fig.1 に示す。居住モジュールを中心にしながら複数の探査ノードを有人、無人のローバーを用いて探査していく。産業システムでは同様の問題に配送経路問題(VRP: Vehicle Routing Problem)、や無人搬送車(AGV: Automated Guided Vehicle)走行経路計画がある。しかし、月面ローバーは、搬送している物資を人間が時間に応じて自己消費する点、走行経路が固定していない点が VRP や AGV とは異なる。このようにサブシステムが離れた位置で運用される分散型システムは、信頼性の向上の点からもその運用計画の立案が自律分散的に運用されることが適当であり、しかも分散化により計算量を抑えた運用システムの開発も容易になる。

3. ラグランジュ分解調整法による定式化

月面ロジスティクスネットワークの物資運搬装置運用計画にラグランジュ分解調整法を利用するための定式化について検討する。Fig. 2 に示すようにローバー (Rover) や物資運搬装置 (Logistics Carrier) の移動を軸方向に限定してモデル化する。速度を v 、時間 t 、走行の方向を δ で表す。ここで物資運搬装置の移動要求をジョブとする。モデル化のための記号と添字を次のように定義する。

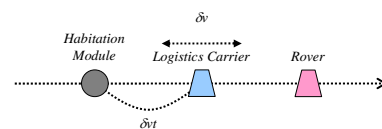


Fig. 2 ローバーと物資運搬装置の走行モデル

i : モジュール、Rover、物資運搬装置の番号 ($i=1,2,\dots,I$)

j : ジョブ番号 ($j=1,2,\dots,J$)

t : タイムスロット番号 ($t=1,2,\dots,T$)

c_j : ジョブ j の切替コスト

h_i : 物資運搬装置 i の 1 単位当たり 1 タイムスロット当たりの補給コスト

x_{it} : 物資運搬装置 i のタイムスロット t での物質量

x_{max} : 物資運搬装置 i の最大物質量

d_{it} : 物資運搬装置 i のタイムスロット t での位置

$d_{ij,obj}$: 物資運搬装置 i のジョブ j による目標位置

D_{Li} : 物資運搬装置 i の位置下限

D_{Ui} : 物資運搬装置 i の位置上限

v_{ijt} : 物資運搬装置 i のジョブ j によるタイムスロット t での速度

B_{ji} : ジョブ j に物資運搬装置 i が関係あるかどうか

(0 : 関係ない, 1 : 関係ある)

δ_{jt} : ジョブ j のタイムスロット t での実行

(-1 : 後進, 0 : 停止, 1 : 前進)

l : ラグランジュ関数

まず、最適化するコストを、走行の切替コスト、移動距離、目標地点からの偏差、居住モジュールからの距離と必要物資充足率との積の4項の和と考える。次に、制約条件付き最適化問題を、ラグランジュ乗数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ジョブ別に分離する。分離可能な元の最適化問題を解くことは、ジョブ j に関する式(1)–式(4)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。

$$\min l_j = \sum_{i=1}^T [c_j (1 - \delta_{j,t-1}) \delta_{jt} + c_j |\delta_{jt}| + (d_{ij,obj} - d_{ij}) / d_{ij,obj}] \quad (1)$$

$$+ h_i (B_{ji} d_{ij} / D_{i,max}) (x_{i,max} - x_{it}) / x_{i,max} + \sum_{i=1}^T \sum_i \lambda_{it} \delta_{jt} B_{ji} \quad (2)$$

$$\text{subject to } d_{i,t+1} = d_{it} + \delta_{jt} v_{ijt} \quad \forall i, t \quad (3)$$

$$d_{it} \geq D_{Li} \quad \forall i, t \quad (4)$$

$$d_{it} \leq D_{Ui} \quad \forall i, t \quad (4)$$

4. 計算例

4.1 物資運搬装置の運用計画

本計算例では、Fig. 4 に示すような月面拠点の酸素供給システムに限定したロジスティクスネットワークの酸素配分問題を解く。このロジスティクスネットワークは居住モジュール1基、有人と圧 Rover 2 台、物資運搬装置1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有人と圧 Rover 1, 2、居住モジュールから物資運搬装置、物資運搬装置から有人と圧 Rover 1, 2 への5つの系統があり、それぞれが同一位置に存在するときに補給可能である。

Table 1 に計算初期設定を示す。Rover 1, 2 の探査計画を事前に与え、物資運搬装置の運用計画を求める。このときの Rover、物資運搬装置、居住モジュールの初期酸素貯蔵量を(e)–(h)に示す。ここで、切替コスト c_j は頻繁に走行や停止を繰り返すことを防ぐ役割を持ち、補給コスト h_i は拠点から離れた場所で物資の充足率が低い状態を回避する役割を持つ。

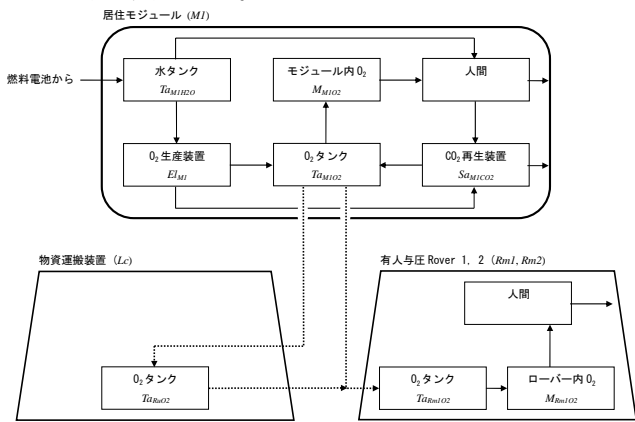


Fig. 4 月面拠点の酸素供給システム

Table 1 計算初期設定

設定	設定値
(a) Rover 1 の位置 [days]	lx1
lx1 = {0,1,2,3,4,5,6,7,6,5,4,3,2,1,0}	
(b) Rover 2 の位置 [days]	lx2
lx2 = {0,0,0,1,2,3,4,5,4,3,2,1,0,0,0}	
(c) 物資運搬装置の初期位置 [days]	0
(d) 物資運搬装置の初期移動方向 [-]	$\delta=0$
(e) Rover 1 の酸素貯蔵量 [CM-days]	14
(f) Rover 2 の酸素貯蔵量 [CM-days]	14
(g) 物資運搬装置の酸素貯蔵量 [CM-days]	28
(h) モジュール1の酸素貯蔵量 [CM-days]	56
(i) 切替コスト c [-]	Fig. 5
(j) 補給コスト h [-]	Fig. 5

4.2 計算結果

本計算では、計算単位に距離[days]、酸素量[CM-days]を導入する。

移動に1日必要な距離、1名のクルーが1日に必要な酸素量をそれぞれ[days]、[CM-days]と表現する。Fig. 5 に Rover 2 台が遠距離（移動に4日間必要な距離）で運用される場合の計算結果を示す。上図は Rover 1 の位置(Lr1)、Rover 2 の位置(Lr2)、物資運搬装置の位置(Lc)を示す。下図は、それぞれの酸素量(Mr1, Mr2, Mc)を示す。物資運搬装置は Rover 1 に追従しながら酸素を補給し、3日目から7日目まで Rover 2 の位置に停止しながら酸素を補給している。8日目以降に Rover 1 に再び追従しながら酸素を補給している。その結果として Rover 1(Mr1)と Rover 2(Mr2)ともに酸素が不足することなく居住モジュールに帰還している。

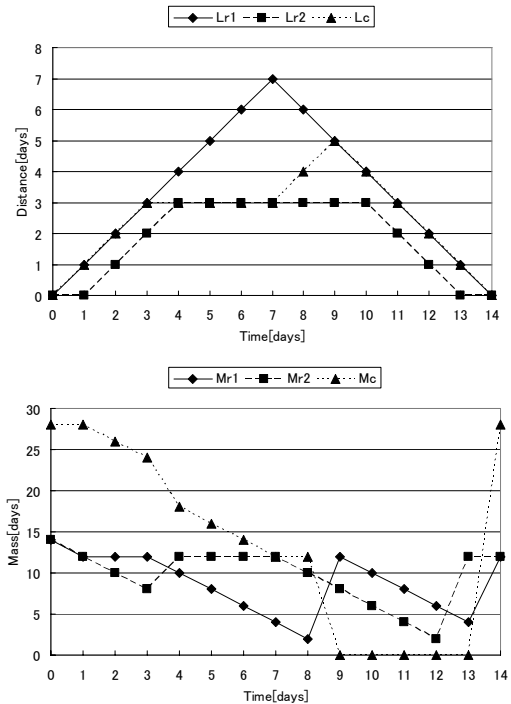


Fig. 5 計算結果 Rover 1, Rover 2、物資運搬装置の位置（上図）と酸素量（下図）の変動 $h=1, c=0.2$

5. まとめ

月面での広域有人探査に備えたロジスティクスネットワークについて提案し、そこで利用される物資運搬装置の運用を定式化し、ラグランジュ分解調整法を用いて運用計画を立案した。本論文では、Rover 2 台、物資運搬装置1台の直線移動のみに限定した例題について、本手法により運用計画が作成できることを確認した。本手法は、動的計画法を利用して計算を行うため、部分問題については計算精度が保証されている。また分解法であるため大規模な問題にも適用が可能である。本手法の評価関数は、2点間の直線移動からネットワーク型の移動に拡張した場合にも利用可能である。今後、ネットワーク型への拡張と、運用台数を増やした場合について検討を行う予定である。

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. Miyajima H., Abe K., Hirosaki T., and Ishikawa Y., Development of Advanced Life Support Systems Control Software Considering Computational Effort and Mathematical Validity, 2007-01-3025, SAE Technical Paper Series, 2007.
3. Miyajima H., Abe K., Hirosaki T., and Ishikawa Y., Development of Advanced Life Support Systems Control Software Integrating Operators' Empirical Knowledge, 2008-01-1973, SAE Technical Paper Series, 2008.