

月面高機動探査のための分散型生命維持システムの運用法

宮嶋宏行 東京女学館大学

2011生態学会年次大会
宇宙航空研究開発機構 調布航空宇宙センター

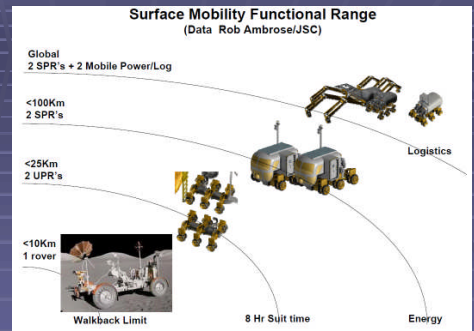
2011年6月15日(水) - 16日(木)

月面高機動探査 拠点から遠征

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

月面拠点の周辺を**数百キロ程度**の広域にわたって遠征

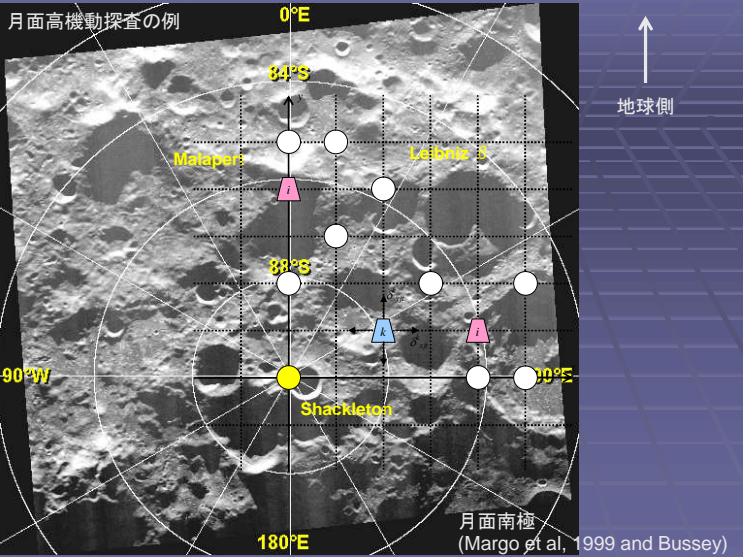
生命維持システムや生命維持に必要な物資は、ある範囲に分散して利用される。



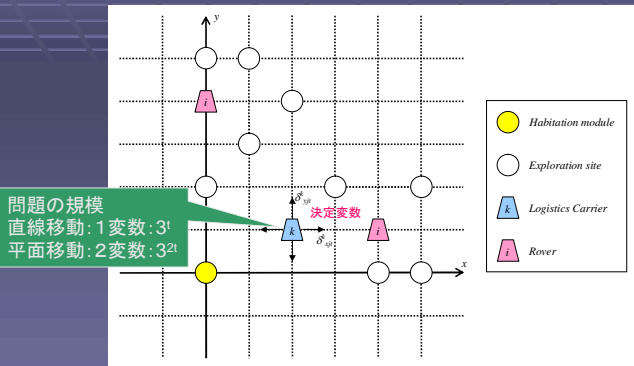
研究目的

- >分散型の生命維持システムへ資源を配分する物資運搬装置の運用計画法を開発する。
- >部分問題の厳密解法として2変数動的計画法を提案する。

月面高機動探査の例



ロジスティクスネットワークの定式化



- >大規模な配送計画問題を実用的な計算時間で解くためには、ヒューリスティクス(最適解は保証されていない)が一般的に用いられる。
- >最適解が保証された**厳密解法**は1台の運搬車が訪問する場所が少ないときに有効。

1次元(1変数)から2次元(2変数)へ拡張... 厳密解法で解ける?

ラグランジュ分解調整法の手順

1. 問題を定式化(元の問題)
2. 元の問題を**部分問題**に分解する(分解可能性)
3. **部分問題**の緩和問題を最適に解く(動的計画法を利用) ... **2変数動的計画法**
4. 部分問題の最適解の情報を用いて元の問題の実行可能解を求める。

部分問題が1変数の場合には、問題の規模に対して指数関数的に計算量が増加しない。部分問題が2変数の場合には?

ラグランジュ分解調整法による物資運搬装置運用の定式化

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \left[\sum_{j=1}^J c_k \sqrt{(\delta_{jt}^k)^2 + (\delta_{jt}^k)^2} + \sum_i h_i A_{ik} \sqrt{(dr_{sit}/D_{xt})^2 + (dr_{sit}/D_{yt})^2} ((M_{U_i} - m_{it})/M_{U_i}) + h_k \sqrt{(dc_{kt}/D_{xt})^2 + (dc_{kt}/D_{yt})^2} ((M_{U_k} - m_{kt})/M_{U_k}) \right]$$

subject to $dc_{(x,y)kt,t+1} = dc_{(x,y)kt} + \delta_{(x,y)kt}^k \cdot v_{(x,y)kt}^k \quad \forall j,k,t$ **物資運搬装置の位置**

$dc_{(x,y)kt} \geq D_{(x,y)L} \quad \forall k,t$ **物資運搬装置の位置下限**

$dc_{(x,y)kt} \leq D_{(x,y)U} \quad \forall k,t$ **物資運搬装置の位置上限**

$m_{i,t+1} = m_{it} + \Delta m_{it} \quad \forall i,t$ **ローバの物資量**

$m_{k,t+1} = m_{kt} + \Delta m_{kt} \quad \forall k,t$ **物資運搬装置の物資量**

$\sum_j \delta_{(x,y)jt}^k B_{(x,y)jk} \leq 1 \quad \forall k,t$ **物資運搬装置の競合**

緩和

$$\min l = \sum_{i=1}^T \sum_{k=1}^K \left[\sum_{j=1}^J c_k \sqrt{(\delta_{xj}^k)^2 + (\delta_{yj}^k)^2} + \sum_{i=1}^I h_i A_{ik} \sqrt{(dr_{xii}/D_{xU})^2 + (dr_{yii}/D_{yU})^2} \left((M_{Ui} - m_{ui}) / M_{Ui} \right) \right. \\ \left. + h_k \sqrt{(dc_{xki}/D_{xU})^2 + (dc_{yki}/D_{yU})^2} \left((M_{Uk} - m_{uk}) / M_{Uk} \right) \right] \\ + \sum_{i=1}^I \lambda_i \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \delta_{(x,y)j}^k B_{(x,y)jk}$$

分解

$$\min l_k = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^J c_k \sqrt{(\delta_{xj}^k)^2 + (\delta_{yj}^k)^2} + \sum_{i=1}^I h_i A_{ik} \sqrt{(dr_{xii}/D_{xU})^2 + (dr_{yii}/D_{yU})^2} \left((M_{Ui} - m_{ui}) / M_{Ui} \right) \\ + h_k \sqrt{(dc_{xki}/D_{xU})^2 + (dc_{yki}/D_{yU})^2} \left((M_{Uk} - m_{uk}) / M_{Uk} \right) \\ + \sum_{i=1}^I \lambda_i \sum_{j=1}^J \delta_{(x,y)j}^k B_{(x,y)jk}$$

計算設定

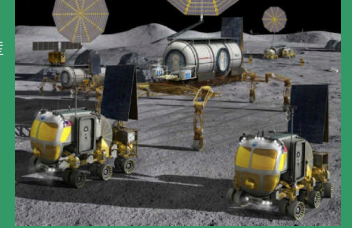
NASA Constellation Architecture Team-Lunar Scenario 12.0を参照

輸送能力

与圧ローバは2人分14日間の物資を輸送が可能
初期酸素量: 与圧ローバ1 & 2: 28 CM-days : 物資運搬装置: 56 CM-days

物質の生産と再生

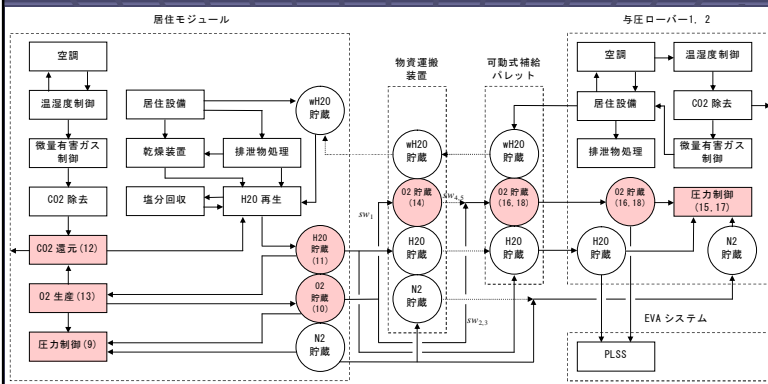
居住モジュールではO₂生産装置により酸素生産
与圧ローバではCO₂の回収を行わない
CO₂還元は、居住モジュールでは行うが、
遠征中の与圧ローバでは行わない。
居住モジュールでは水の再生を行うが、
与圧ローバでは水の回収のみを行う。



計画問題

与圧ローバ1 & 2に2人ずつ乗り、28日間(2倍の期間)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。
距離[days]=50km、300kmx300kmの範囲で1000km程度の走行を想定。
与圧ローバ1 & 2、物資運搬装置のO₂貯蔵量を規定の範囲内に維持

月面拠点の酸素供給システム



酸素供給システムモデル

酸素タンク

$$Ta_{M1O2}(t+1) = Ta_{M1O2}(t) + pO_{2Sa}(t) + pO_{2Er}(t) - rO_{2M1}(t) - sw_1 - sw_2 - sw_3 \quad \text{居住モジュール}$$

$$Ta_{L1O2}(t+1) = Ta_{L1O2}(t) + sw_1 - sw_4 - sw_5 \quad \text{物資運搬装置}$$

$$Ta_{R1O2}(t+1) = Ta_{R1O2}(t) - rO_{2R1}(t) + sw_2 + sw_4 \quad \text{与圧ローバ1}$$

$$Ta_{R2O2}(t+1) = Ta_{R2O2}(t) - rO_{2R2}(t) + sw_3 + sw_5 \quad \text{与圧ローバ2}$$

補給モデル

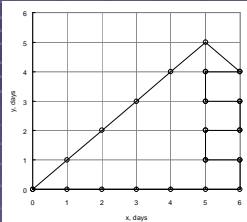
$$sw_j = \begin{cases} \text{if } (dc_1 = 0) & sw_1 = Ta_{L1O2max} - Ta_{L1O2}(t) \\ \text{if } (dr_2 = 0) & sw_2 = Ta_{R1O2max} - Ta_{R1O2}(t) \\ \text{if } (dr_3 = 0) & sw_3 = Ta_{R2O2max} - Ta_{R2O2}(t) \\ \text{if } (dc_1 = dr_2) & sw_4 = Ta_{R1O2max} - Ta_{R1O2}(t) \\ \text{if } (dc_1 = dr_3) & sw_5 = Ta_{R2O2max} - Ta_{R2O2}(t) \end{cases}$$

物資運搬装置 = 居住モジュール
与圧ローバ1 = 居住モジュール
与圧ローバ2 = 居住モジュール
物資運搬装置 = 与圧ローバ1
物資運搬装置 = 与圧ローバ2

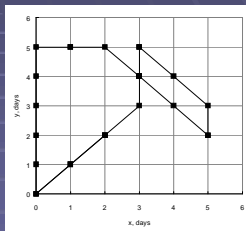
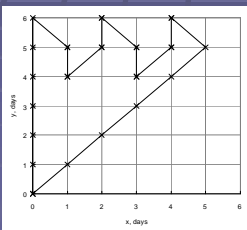
移動軌跡

居住モジュールに4人滞在、2人乗り
与圧ローバ2台で28日間の遠征

与圧ローバ1
探査計画



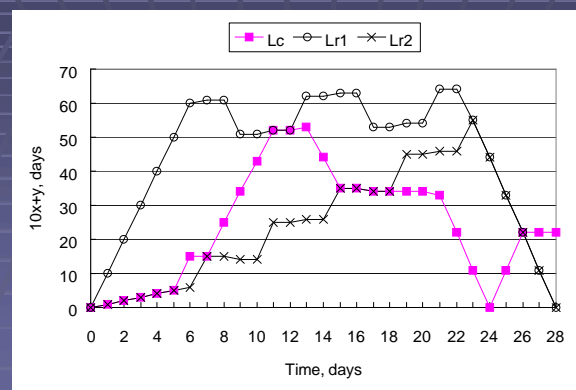
与圧ローバ2
探査計画



物資運搬装置の運用計画

位置の変化

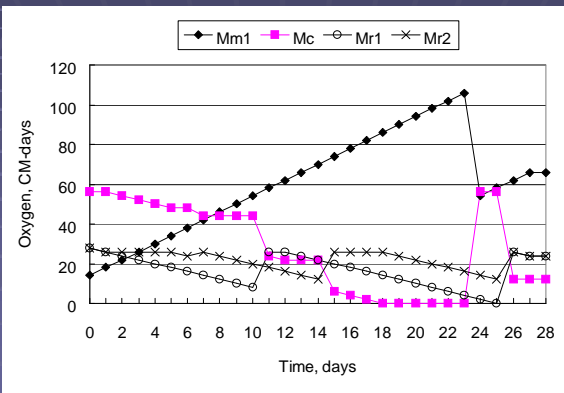
物資運搬装置(Lc)、与圧ローバ1(Lr1)、2(Lr2)



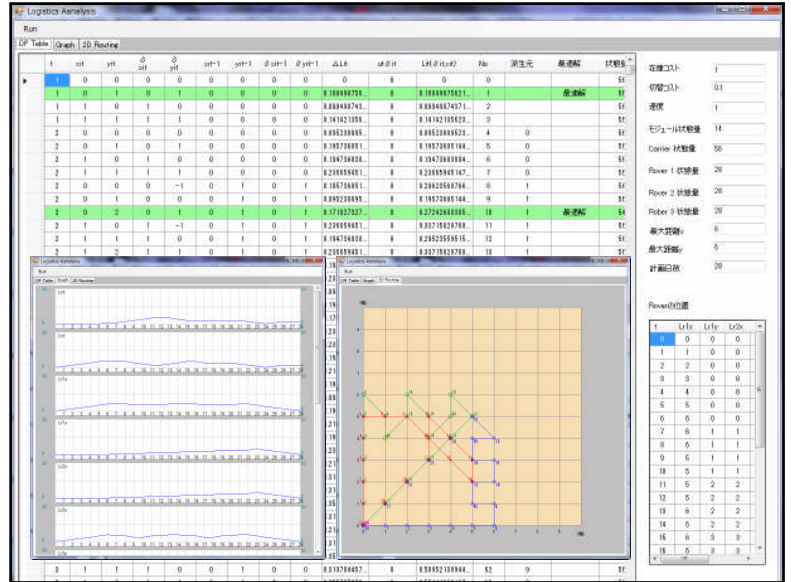
距離の単位[days]は、1日で移動できる距離を意味する。

酸素量の変化

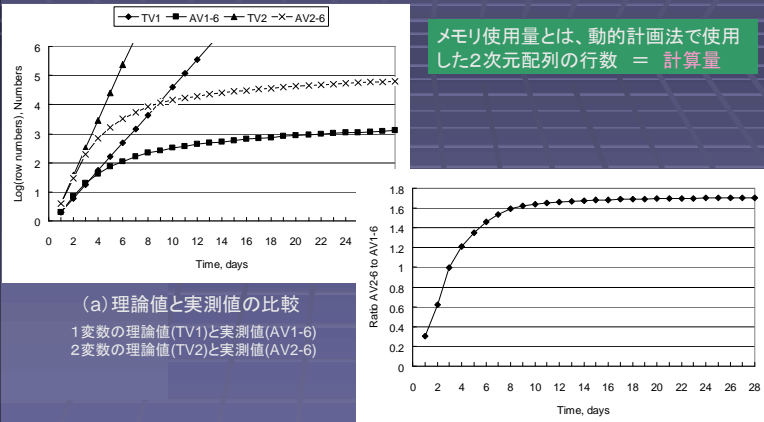
居住モジュール(Mm1)、物資運搬装置(Mc)、与圧ローバ1(Mr1)、2(Mr2)



酸素量の単位[CM-days]は1名のクルーが1日に消費する酸素量を意味する。



1変数と2変数のメモリ使用量の比較



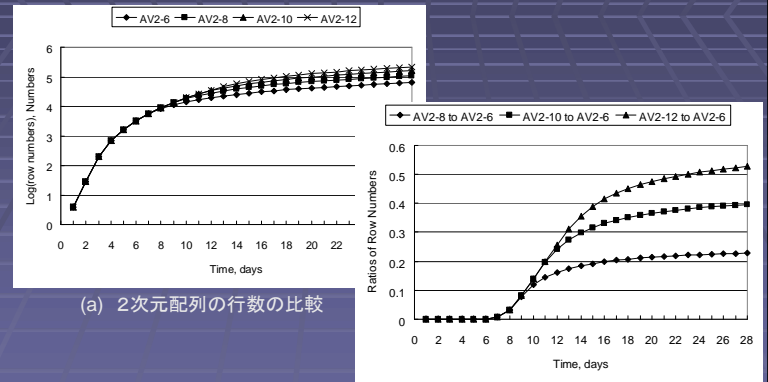
(a) 理論値と実測値の比較

1変数の理論値(TV1)と実測値(AV1-6)
2変数の理論値(TV2)と実測値(AV2-6)

(b) 1変数と2変数の実測値の比較

AのBIに対する比は、 $\log(A) - \log(B)$

xy座標の状態数を増やした場合のメモリ使用量の比較



(a) 2次元配列の行数の比較

(b) 状態数6に対する状態数8、10、12のメモリ使用量

計算時間の比較

xy座標の最大状態数	6	8	10	12
1変数の場合の時間[msec]	55	63	72	79
状態数6に対する比 [-]	1.00	1.15	1.31	1.44
2変数の場合の時間[msec]	7947	24155	54647	99892
状態数6に対する比 [-]	1.00	3.04	6.88	12.57

計算環境: Dell Vostro 200 Intel® Core(TM)2 Duo CPU E8300 @2.83GHz, RAM 4.00 (3.24使用可能), OS Windows Home Premium SP1. 計測方法: 2変数DPの計算部分のみの時間を計測した。その他のグラフ描画などの処理時間を含まない。

まとめ

- 月面での高機動探査において利用される物資運搬装置の運用を定式化し、その運用計画法を開発した。
- 与圧ローバ2台、物資運搬装置1台の運用について、28日間の物資運搬装置の運用計画を作成した。
- 物資運搬装置(部分問題)の厳密解法として2変数動的計画法を提案し、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。(B)
- 本手法の特徴(A)は、与圧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。

この特徴(A)と今回確認できた2つの特徴(B)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。

近似解法ではなく、厳密解法であるため計画の実現性を確認できる

遠征中の探査計画変更や、突発的な事象による探査計画変更に対応して、短時間で運用計画を再立案できる。