

月面南極付近での広域有人探査のための生命維持システムの検討

宮嶋宏行 東京女学館大学

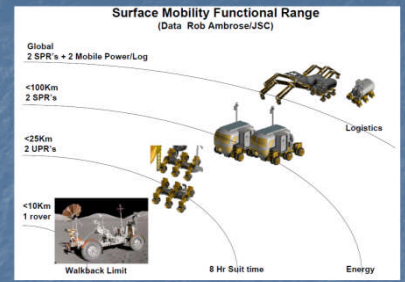
2012生態工学会年次大会
2011年6月16日(土) - 17日(日)
北里大学獣医学部

月面広域有人探査 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

- 機動的な月面探査のために資源の供給と回収を行う物資運搬装置の運用計画法と生命維持システムの構成を提案
- 月周回衛星「かぐや」のレーザ高度計データにより作成した地形を利用して、シャクルトンクレータからカベウス、マラバートに遠征する探査について検討

月・火星アナログ試験 @ARIZONA ロボ、EVAの技術開発

Desert Research and Technology Studies (DRTS) 1997

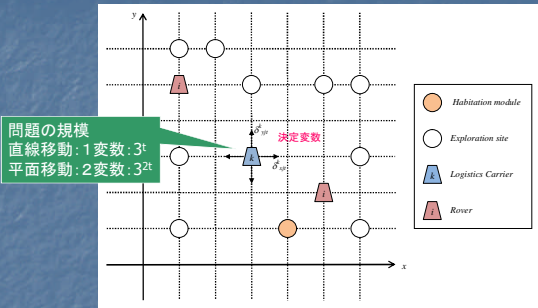


2010年の試験
通信方式: 連続(CC)、2回/日(2XD)
ロボ運用: 分割統治(DC)、指導追従(LF)

どのように科学的成果を向上させるのか?

ロボ、居住環境、ロボットの最も効果的な組合せ
最適なクルーサイズ
自動運用の有効性 自動 vs 遠隔
通信遅れの影響(連続通信、2回/日通信)

移動探査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のために、部分問題の厳密解を求める方法を開発

平面(2次元)の問題へ地形情報を追加

ラグランジュ分解調整法による定式化

$$\min \sum_{i=1}^T \sum_{k=1}^K \left[\sum_{j=1}^J c_k \sqrt{(\delta_{ij}^k)^2 + (\delta_{jk}^i)^2} + \sum_l h_l A_k \sqrt{((dr_{il} - d_{il})/D_{il})^2 + ((dr_{jk} - d_{jk})/D_{jk})^2} \right] \left((M_{il} - m_{il})/M_{il} \right) \quad \text{地形効果}$$

$$+ h_k \sqrt{((dc_{il} - d_{il})/D_{il})^2 + ((dc_{jk} - d_{jk})/D_{jk})^2} \left((M_{jk} - m_{jk})/M_{jk} \right) + te - G(dc_{il}, dc_{jk})$$

subject to $dc_{(i,j)k,t+1} = dc_{(i,j)k,t} + \delta_{(i,j)k}^k - \gamma^k \delta_{(i,j)k}^k, \forall j,k,t$ 物資運搬装置の位置

$dc_{(i,j)k,t} \geq D_{(i,j)k,t} \quad \forall k,t$ 物資運搬装置の位置下限

$dc_{(i,j)k,t} \leq D_{(i,j)k,t} \quad \forall k,t$ 物資運搬装置の位置上限

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

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

$\sum_j \delta_{(i,j)k}^k B_{(i,j)k} \leq 1 \quad \forall k,t$ 物資運搬装置の競合

ラグランジュ分解調整法の手順

- 問題を定式化(元の問題)
- 元の問題を部分問題に分解する(分解可能性)
- 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
- 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。

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(+2日間)の物資を輸送
 初期酸素量: 与圧ローバ1 & 2: 64 CM-days
 物資の単位[CM-days] = (一人の半日消費量)

物質の生産と再生

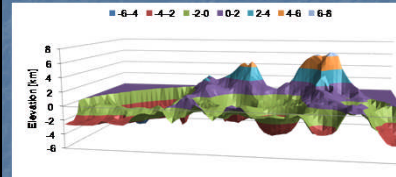
| | 居住モジュール | ローバ |
|-----------------------|---------|-----|
| O ₂ 生産 | あり | なし |
| CO ₂ 回収・還元 | あり | なし |
| 排水回収 | あり | あり |
| 水再生 | あり | なし |



計画問題

与圧ローバ1 & 2に2人ずつ乗り、分割統治方式で運用。カベウス、マラパルトへの28日間(2倍の期間)の探査計画のための、物資運搬装置の運用計画を求める。
 距離の単位[days] = 8km (半日で進む距離), 96kmx56kmの範囲を400km程度走行。
 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、水の配分、排水の回収

月面南極付近の地形



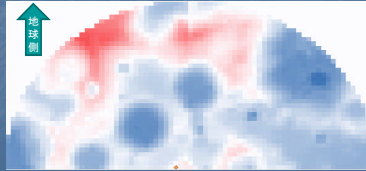
経度 -85deg ~ -90deg
 緯度 -90deg ~ -90deg

手前中心が南極、奥が地球方向、横に300km、奥行150km

2つの山は、
 左: Cabeus (84.9° S 35.5° W)

右: Malapert (84.9° S 12.9° E)
 Leibnitz beta (84° S 39° E)

Shackleton crater (89.9° S 0.0° E)



物資収支

人間生命維持の入出力

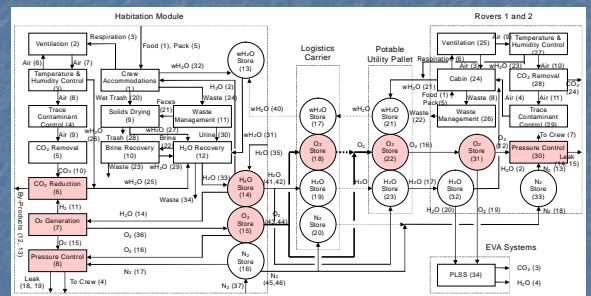
| Input | EVAなし kg/CM-day | EVAあり kg/CM-day | Output | EVAなし kg/CM-day | EVAあり kg/CM-day |
|----------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|--------------------|
| 酸素 | 0.835 | 0.974 | 二酸化炭素 | 0.998 | 1.165 |
| 食料(乾燥) | 0.617 | 0.720 | 尿(固形) | 0.059 | 0.069 |
| 食料補水、食料中水分 | 1.424 | 1.662 | 便(固形) | 0.032 | 0.037 |
| 飲料水 | 2.100 | 2.451 | 汗(固形) | 0.018 | 0.021 |
| | | | 呼吸と汗(水分) | 2.277 | 2.657 |
| | | | 尿(水分) | 1.501 | 1.752 |
| | | | 便(水分) | 0.091 | 0.106 |
| 衛生用水 | 0.560 | 0.560 | 衛生排水 | 0.560 | 0.560 |
| 尿洗浄水 | 0.300 | 0.300 | 尿洗浄排水 | 0.300 | 0.300 |
| 水(体内)合計 | 3.524 | 4.113 | 水(体内)合計 | 3.869 | 4.515 |
| 水合計 | 4.384 | 4.973 | 水合計 | 4.729 | 5.375 |
| 合計 | 5.836 | 6.667 | 合計 | 5.836 | 6.667 |

CO₂還元とO₂生産の水収支

| Input | EVAなし kg/CM-day | EVAあり kg/CM-day | Output | EVAなし kg/CM-day | EVAあり kg/CM-day |
|---------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|
| CO ₂ | 0.998 | 1.165 | 2H ₂ O | 0.817 | 0.953 |
| 2H ₂ | 0.091 | 0.106 | C | 0.272 | 0.318 |
| CO₂還元合計 | 1.089 | 1.271 | CO₂還元合計 | 1.089 | 1.271 |
| 2H ₂ O | 0.339 | 1.096 | O ₂ | 0.835 | 0.974 |
| | | | 2H ₂ | 0.104 | 0.122 |
| O₂生産合計 | 0.939 | 1.096 | O₂生産合計 | 0.939 | 1.096 |

EVA 2人 x 6回/週 1回あたり2リットルの水を捨てる

月面拠点の分散型生命維持システム



月面拠点6人滞在、そのうちローバで2人 x 2台で28日間遠征

酸素供給システムモデル

酸素タンク

$$Ta_{M1O_2}(t+1) = Ta_{M1O_2}(t) + pO_{2,sa}(t) + pO_{2,rb}(t) - rO_{2,M1}(t) - sw_1 - sw_2 - sw_3 \quad \text{居住モジュール}$$

$$Ta_{L1O_2}(t+1) = Ta_{L1O_2}(t) + sw_1 - sw_4 - sw_5 \quad \text{物資運搬装置}$$

$$Ta_{R1O_2}(t+1) = Ta_{R1O_2}(t) - rO_{2,R1}(t) + sw_2 + sw_4 \quad \text{与圧ローバ1}$$

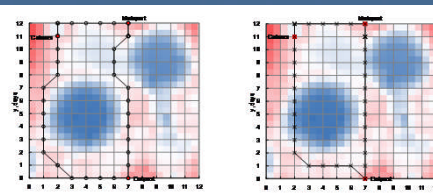
$$Ta_{R2O_2}(t+1) = Ta_{R2O_2}(t) - rO_{2,R2}(t) + sw_3 + sw_5 \quad \text{与圧ローバ2}$$

補給モデル

$$sw_j = \begin{cases} \text{if } (dc_j = 0) & sw_1 = Ta_{L1O_2, \max} - Ta_{L1O_2}(t) \\ \text{if } (dr_1 = 0) & sw_2 = Ta_{R1O_2, \max} - Ta_{R1O_2}(t) \\ \text{if } (dr_2 = 0) & sw_3 = Ta_{R2O_2, \max} - Ta_{R2O_2}(t) \\ \text{if } (dc_1 = dr_1) & sw_4 = Ta_{R1O_2, \max} - Ta_{R1O_2}(t) \\ \text{if } (dc_1 = dr_2) & sw_5 = Ta_{R2O_2, \max} - Ta_{R2O_2}(t) \end{cases}$$

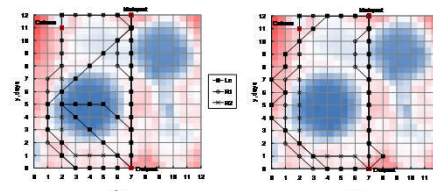
物資運搬装置 = 居住モジュール
 与圧ローバ1 = 居住モジュール
 与圧ローバ2 = 居住モジュール
 物資運搬装置 = 与圧ローバ1
 物資運搬装置 = 与圧ローバ2

水の供給、排水の回収についても同様のモデル化



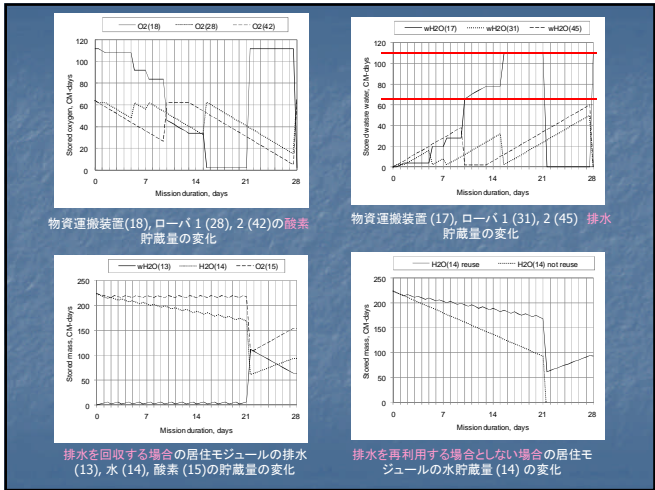
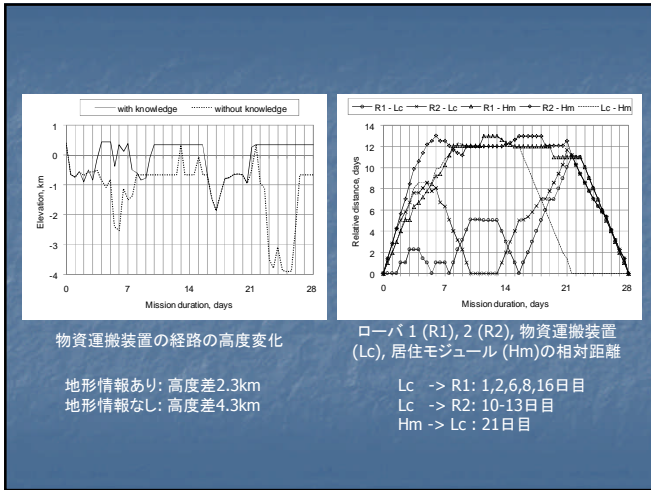
(a) ローバ1 (R1)の経路

(b) ローバ2 (R2)の経路



(c) 地形情報なしの場合の物資運搬装置 (LC)の経路

(d) 地形情報ありの場合の物資運搬装置 (LC)の経路



まとめ

- 月面南極付近での機動的な月面有人探査のための分散型生命維持システムの物質収支および運用(分割統治方式)を検討した。
- ラグランジュ分解調整法を用いて定式化した物資運搬装置の運用計画法に、月周回衛星「かぐや」のレーザ高度計データにより求めた地形情報を追加
- 月面南極のシャクルトンクレータからカベウス、マラパートに遠征する28日間の有人探査において、本手法は、物資運搬装置が、月面の山やクレータを避けながら、所要の貯蔵能力の範囲内で、酸素と水を2台の与圧ローバへ供給し、排水を居住モジュールへ回収する運用計画の作成に成功した。