

先端生命維持システム運用のための スケジューリングアルゴリズムの開発

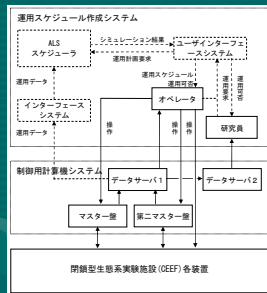
宮嶋宏行 東京女学館大学
 広崎朋史 宇宙システム開発
 石川芳男 日本大学

先端生命維持システムの 要求と技術 (NASA JSC 38571,1998)

- 要求
 - ミッションの長さや目的地から独立もしくは限りなく独立している
- 技術
 - すべての物流コストを最小化して、宇宙で居住するために必要な資源を最小化するために**空気・水・食料を再生**して住むことができることを確かめ、そして、自給自足を促進する。
 - 最適な資源の再生を達成するために**廃棄物を管理**してリサイクルし、居住環境の安全を維持し、廃棄物の貯蔵と増加を最小にする。
 - システムの適切な監視制御を保證して、ライフサポートシステムの運用に人間が関与するのを最小化する。
 - 危険な状態(火災・毒汚染の増加)を取り除いて適切な環境監視を実現する。
 - クルーに危険を強いることなしに、使い捨ての熱源を使うことなしに、熱制御を実現する。
 - 構成部分とシステムの恒久的な信頼性を保証する。
 - サイトメンテナンスを実現する。
 - 惑星環境へのライフサポートの影響を最小にする。

CEEF監視制御システムの検討から先端生命維持システムの監視制御システムの検討へ

3つの層からなる階層制御について検討



プランニング&スケジュー
 リングレベル
 タスクの実行順序を管理

タスクレベル
 事象の進行を管理
 コントロールレベル
 状態を計測し制御

→ 宇宙システムで利用できるスケジューリングアルゴリズムについて考える。

宇宙システムで利用することを考える

- 計算機資源の**制約**
 - 計算量を抑える必要がある
- 計算方法の**信頼性**
 - 数学的厳密性が必要である
- 計算方法の**柔軟性**
 - 状況が変化した場合に、時間をかけて最適解を探す能力だけでなく、短時間で準最適解を探す能力も必要である。

研究の目的

- 研究の目的
 - システムの規模に対して、**指数的に計算量が増加しない数学的厳密性を備えたスケジューリングアルゴリズムの開発**
- 本発表の論点
 - ラグランジュ分解・調整法による定式化
 - ラグランジュ乗数の決定法
 - 本手法によるスケジュールと人間が作成したスケジュールの比較

スケジューリングの方法

- スケジューリング問題は組合せ問題であり、問題の規模に応じて計算量が**指数的に増加する**。
- 従来のスケジューリングの方法
 - **数理計画法・・・数学的解法**
 - 数学的に最適解を求めることができるが、次元が大きくなると解くことが難しい。
 - **ディスパッチングルール・・・経験的解法**
 - どのような問題にも適用でき、計算量に無駄がないが、ルールの獲得は経験によるところが大きい。

ラグランジュ分解・調整法・・・計算量の削減

ラグランジュ分解・調整法による定式化と部分問題への分解

定式化

$$\min \{f(x) | g(x) \leq 0\} \quad \text{拘束条件付き最適化}$$

ラグランジュ関数

$$l(x, \lambda) = f(x) + \lambda g(x) \quad \text{拘束条件なし最適化(拘束条件の緩和)}$$

部分問題への分解

$$f(x) = f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots$$

$$g(x) = g_1(x_1) + g_2(x_2) + \dots$$

が可能であるとき以下の2つの式が同じである

$$\min_x l(x, \lambda) = \sum_j \min_{x_j} l_j(x_j, \lambda)$$

部分問題の最小化の和

先端生命維持システムのスケジュール問題の定式化

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J c_j (1 - \delta_{j,t-1}) \delta_{j,t} \quad \text{装置の切替コスト}$$

$$\text{subject to } x_{i,t+1} = x_{i,t} + \sum_{j=1}^J \delta_{j,t} \alpha_{ij} - r_i \quad \forall i, t \quad \text{状態量の変化の制約}$$

$$x_{i,t} \geq X_{Li} \quad \forall i, t \quad \text{状態量の下限制約}$$

$$x_{i,t} \leq X_{Ui} \quad \forall i, t \quad \text{状態量の上限制約}$$

$$\sum_j \delta_{j,t} M_{jm} \leq 1 \quad \forall t, m \quad \text{装置の競合制約}$$

緩和法

$$\min \quad l = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J c_j (1 - \delta_{j,t-1}) \delta_{j,t} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \theta_i (X_{Li} - x_{i,t}) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \mu_i (x_{i,t} - X_{Ui}) + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \lambda_m \left(\sum_{j=1}^J \delta_{j,t} M_{jm} - 1 \right)$$

部分問題に分解

ジョブ(ある時間幅を持った処理のまとまり)別に分解できるか

$$\min \quad l = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J c_j (1 - \delta_{j,t-1}) \delta_{j,t} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \theta_i (X_{Li} - x_{i,t}) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \mu_i (x_{i,t} - X_{Ui}) + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \lambda_m \left(\sum_{j=1}^J \delta_{j,t} M_{jm} - 1 \right)$$

$$\min \quad l_j = \sum_{t=1}^T c_j (1 - \delta_{j,t-1}) \delta_{j,t} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \theta_i (X_{Li} - x_{i,t}) B_{ji} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \mu_i (x_{i,t} - X_{Ui}) B_{ji} + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \lambda_m \delta_{j,t} M_{jm}$$

ジョブ別に分解可能

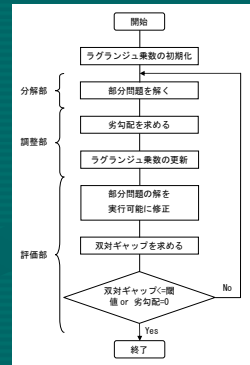
ラグランジュ分解・調整法の手順

調整部(部分問題の競合調整)

- 装置の競合が発生した場合、ラグランジュ乗数(装置の使用料)をうまく設定すると、ジョブは他の時間に逃げ、高い使用料を払ってもその装置を使用したいジョブが1つだけ残る(オークション理論)。
- 劣勾配(装置の過不足)を用いて値上げ幅を決める。

評価部

- (制約違反が含まれる解を)実行可能に修正
- 双対ギャップ: 0で最適解、0に近ければ最適解に近い近似解



ラグランジュ分解調整法の手順

ラグランジュ乗数の決め方の実際

装置の使用料

$$\lambda = \lambda + s_i \cdot \text{subgrad}(\lambda) \quad \text{劣勾配を用いて値上げ幅を決める。}$$

下限制約

$$\theta_i = \begin{cases} \theta_i + \max(X_{Li} - x_{i,t}, 0) & x_{i,t} < X_{Li} \\ (X_{Li} - x_{i,t}) / (X_{Li} - X_{Li}) & X_{Li} < x_{i,t} < X_{Li} \\ 0 & \text{other} \end{cases}$$

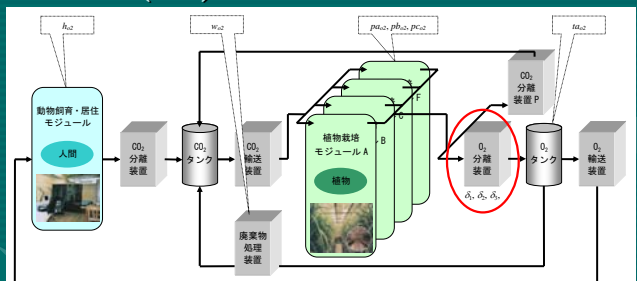
制約違反がない場合にも勾配をつけ、制約違反の前兆を知らせる工夫を行う。

上限制約

$$\mu_i = \begin{cases} \mu_i + \max(x_{i,t} - X_{Ui}, 0) & x_{i,t} > X_{Ui} \\ (x_{i,t} - X_{Ui}) / (X_{Ui} - X_{Ui}) & X_{Li} < x_{i,t} < X_{Ui} \\ 0 & \text{other} \end{cases}$$

下限 上限

計算例(1/4) CEEF気体循環システム

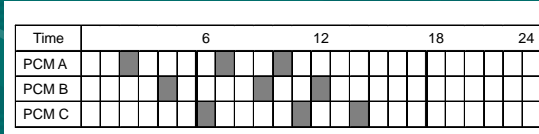
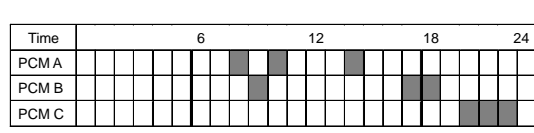


Time	6	12	18	24
PCM A (Rice) 30m ²	■	■	■	■
PCM B (Rice) 30m ²	■	■	■	■
PCM C (Soybeans) 30m ²	■	■	■	■
人間	■	■	■	■

本手法と(熟練した)人間が作成したスケジュールの比較

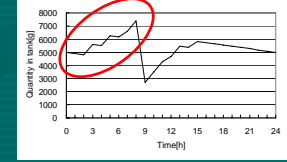
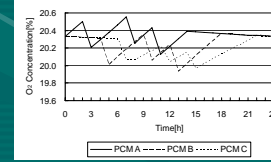
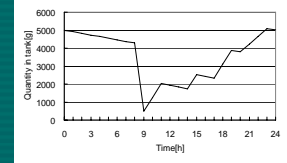
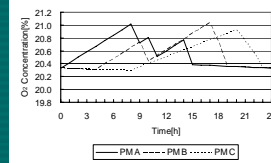
計算例(2/4) 計算結果 O₂分離装置の運用状況

上段:本手法, 下段:人間が作成



計算例(3/4) 計算結果 状態量の変化

上段:本手法, 下段:人間が作成

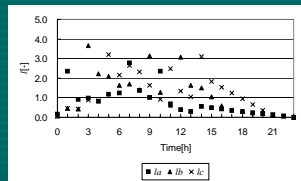
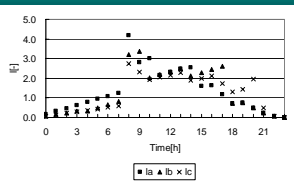


PCM O₂濃度の変動 (Min19.5~Max23.5)

O₂タンクの変動 (Min0~Max10000)

計算例(4/4) 計算結果 ラグランジュ関数

左:本手法, 右:人間が作成



ラグランジュ関数の意味
装置の切替コスト
状態量の上限と下限の制約
装置の競合

まとめ

- ラグランジュ分解・調整法による定式化・・・計算量、信頼性
 - 部分問題への分解が可能 → 指数的に計算量の増加が起こらない数学的厳密性を備えた方法でスケジューリングが可能である。
- ラグランジュ乗数の決定法・・・柔軟性
 - オークション理論により価格を調整することで、部分問題の競合の調整ができる。
- (熟練した)人間が作成したスケジュールとの比較
 - ラグランジュ関数という1つの指標で(熟練した)人間が作成したスケジュールを見た場合、そのラグランジュ関数値には大きなばらつきが見られる。→ (熟練した)人間はラグランジュ関数に今回含めた指標とは別の指標を用いて意思決定している。
 - (熟練した)人間のようなスケジューリングの実現は今後の課題

ラグランジュ分解・調整法は、宇宙で利用される先端生命維持システムの監視制御にも利用できる可能性が高いと言える。