



宇宙ステーション補給機「こうのとり」 — 輸送機のための荷物配置問題 —

高玉圭樹（電気通信大学）

AI 技術が宇宙業界を変える？

宇宙と言えば、NASA（アメリカ航空宇宙局）や ESA（欧州宇宙機関）を思い浮かべるかもしれないが、日本の JAXA（宇宙航空研究開発機構）も重要な任務を果たしている。たとえば、宇宙飛行士の水や食料、実験装置などの物資を国際宇宙ステーション（International Space Station : ISS）まで運ぶ宇宙船として、宇宙ステーション補給機「こうのとり」（H-II Transfer Vehicle : HTV）が活躍している。スペースシャトルが退役した今、ISS の維持に必要な機器類は HTV なしには運べない状況にある。また、物資を運んだ後は、不必要になった実験機器や衣類などを HTV に積み込み、大気圏に再突入して燃焼させるため、ISS のゴミ処理にも貢献している。

このような宇宙機を始め、ロケットや人工衛星の開発は宇宙業界において中核をなすものであり、ハードウェアが主たる技術と着目されている。一方で、人工知能（Artificial Intelligence : AI）などのソフトウェア技術はどうであろうか？ 惑星表面などを詳細にかつ広範囲にわたって移動探査するローバ

などの自律化・知能化などの研究は進められているものの、NASA や ESA を超える情報技術は多くはない。しかし、そのような現状に甘えているのではなく、NASA や ESA から求められる技術を開発し、日本から発信していくべきであろう。本稿でその一例を紹介する。具体的には、HTV で物資を運ぶ際に姿勢を崩さず、燃料を削減可能な荷物の積み方を最適化する技術を紹介する。

宇宙ステーション補給機 HTV

◆ HTV とは

HTV は H-IIB ロケットで打ち上げられ、切り離された後は図-1 に示すように自らの推進力で ISS に接近し、ロボットアームで把持され ISS に結合される。結合後は宇宙飛行士が船内から物資を運び、ロボットアームを用いて船外から大きな部品を取り出す。HTV 以外にもロシアのプログレス補給船と ESA の補給機（Automated Transfer Vehicle : ATV）は ISS に物資を運搬できるが、プログレス補給船や ATV が船内物資のみを輸送するのに対し、HTV は船内用・船外用のどちらの物資も輸送できることが特徴である。

HTV は直径約 4 m、全長 10 m の大きさで観光バスに匹敵し、3 つの部分から構成される。具体的には、補給物資を格納する「補給キャリア」、誘導制御系・電力供給系・通信データ処理系が搭載される「電気モジュール」、そして、メインエンジン、姿勢制御用のスラスタ、燃料／酸化剤タンクが搭載される「推進モジュール」である。

このうち「補給キャリア」に着目すると、HTV は図-2（左）に示すように 2 つのベイ（No.1 Bay

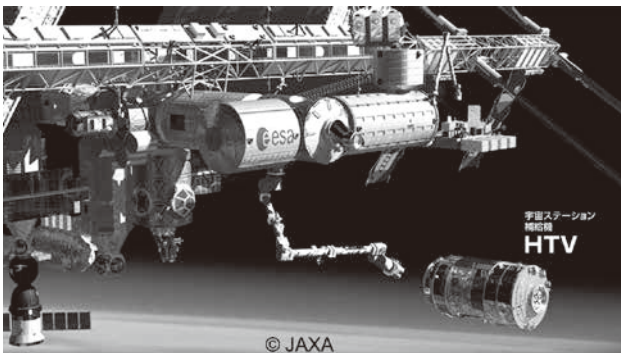


図-1 ISS と HTV 〈本特集 (p.652) にてカラー画像掲載〉

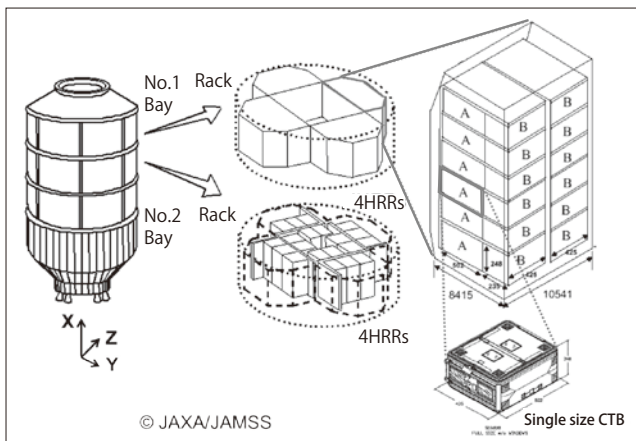


図-2 HTVの構成

と No.2 Bay) からなり、図-2 (中) に示すように各ベイは4つのラック (HTV Resupply Rack : HRR) からなる。この図では8つのラックが搭載されている。さらに、図-2 (右) に示すように各ラックには数多くのカーゴ (Cargo Transfer Bag : CTB) が搭載される。多くのカーゴのサイズはハーフ、シングル、ダブル、トリプルサイズの4種類 (シングルサイズを基準に半分、等倍、2倍、3倍の大きさ) となる。さらに、それらをまとめたものとして、M02 バック (シングルサイズ4つ分の大きさ)、M01 バック (シングルサイズ6つ分の大きさ) の2種類が存在する。なお、図-2 (右) の“A”と記されたカーゴはシングルサイズ、“B”と記されたカーゴはハーフサイズとなる。カーゴの重さは搭載する物資によるので、同じサイズでも重さは異なる。

◆ 厳しいカーゴ搭載制約

HTVの重量は搭載物資を搭載しない状態で最大約10.5(t)であるのに対し、その半分以上である最大約6(t)の物資を搭載可能であるため、物資の配置によっては、HTVの重心が機体の中心から大幅にずれ、自らの姿勢を制御して計算された軌道を正確に移動するために、必要以上の燃料を費やすことになる。このような無駄な燃料費を削減して、安定的な飛行をするために、HTVの重心が機体の中心近くになるようにカーゴを配置することが重要となる。具体的には、図-2 (左) に示すYZ軸平面においてHTVの重心が半径25mm以内に入ることが要求されている

(なお、図-2 (左) ではX軸が縦方向、YZ軸平面がHTVを上から見た平面となる)。

ここで、HTVが観光バスに匹敵することを考えると、半径25mmの円がいかに小さく厳しい制約であるかが分かる。このような制約の厳しいカーゴレイアウトは人手では限界があるばかりか、ヒューマンエラー (計算ミス) を招く可能性が高くなる。さらに、予定カーゴの重さの変更やカーゴの到着遅れによる再計算は時間的に不可能である。このような背景から、カーゴをHTVに搭載する一連の流れのカーゴインテグレーション業務をサポートするシステム (ここでは、カーゴの配置を決定するカーゴレイアウトシステム) が重要となっている。

カーゴレイアウトシステム

◆ 自らの意思で行動するカーゴ

前章で述べた問題を解決するために、我々はマルチエージェントシステムの概念を導入したカーゴレイアウトシステムを構築し、その有効性を実ミッションに基づくデータを用いて検証¹⁾している (その後、廃棄カーゴを始め、さまざまなケースでの検証や重いカーゴを極端に偏らせた場合でのフィジビリティ解析を実施し、現在に至っている)。このシステムの特徴は、オペレータの視点で個々のカーゴの配置を決めるという従来方法ではなく、図-3に示すようにカーゴをエージェントとして捉え、カーゴ自らが独立にHTVの重心が機体の中心に近づくように移動し、配置を決定することである。つまり、カーゴそのものが複数のif-thenルールを持った自律主体として配置を決めるアプローチをとっている。

具体的な流れとしては、物資を搭載する前のHTVの重心を計算した後、重心に最も影響しそうな大きなカーゴから順番に配置し、そのカーゴは自らのif-thenルールに基づいて移動する。たとえば、if「上下左右前後の位置に移動可能」then「一番重心が機体の中心に近づく方に移動」というルールに基づいて移動する。また、なるべくラックの前面に配置したいカーゴ (実験に使う微生物などはすぐに取り

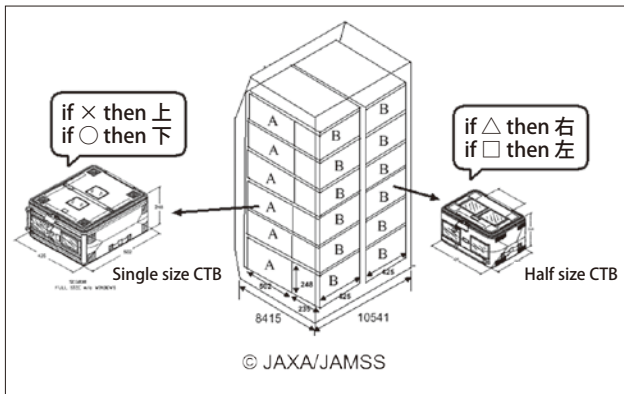


図-3 エージェントとしてのカーゴ

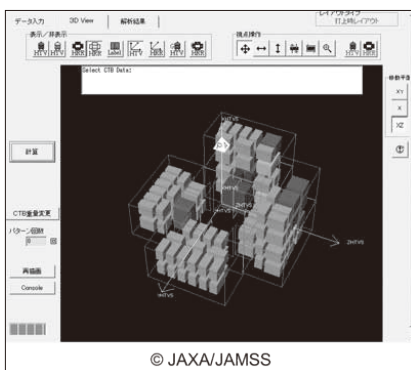


図-4 カーゴレイアウトシステム
(本特集 (p.652) にてカラー画像掲載)

出すために前面に置く) は、上記のルールを if「前面に移動可能」then「前面に移動」のように変える。次に、カーゴの配置が完了したら、任意のカーゴ(あるいはその複数個のカーゴ)を上下左右前後のカーゴや任意の位置のカーゴと交換し、重心が機体の中心に近づくならそのまま、離れるなら元に戻す操作を繰り返す。このとき、複数のカーゴをグループ化して移動させたい場合、該当カーゴにグループ単位で移動する if-then ルールを与え、グループ化の必要のないカーゴにはカーゴ単位で移動する if-then ルールを与える。最終的には、すべてのカーゴが移動あるいは交換しても HTV の重心が機体の中心に近づくかなくなると計算を中止する。図-4 に提案システムで計算したカーゴレイアウトを示す(この図において一番数の多いカーゴはシングルサイズのカーゴである)。

◆ カーゴレイアウトアルゴリズム

提案システムでは、個々のカーゴが AI を持ったエージェントとして機能し、各カーゴが(ときには複数個のカーゴがまとまって)自らのルールに従っ

て最適な位置を目指して移動する。そのアルゴリズムを簡単にまとめると次のようになる。

1. カーゴサイズ決定: 配置するカーゴサイズを決定する。ここでは、サイズの一番大きなもの(M01 バッグ)から最も小さいもの(ハーフサイズのカーゴ)へと順番に配置する。これは大きなサイズのカーゴの方が HTV の重心に大きな影響を与える可能性が高いこと、小さなカーゴに比べて自由に移動できないためである。
2. カーゴ選定: 1. で決めたサイズのカーゴの中で、1つのカーゴを選定し、配置されていない場所にランダム(あるいは何らかの規則に従って)に配置する。
3. カーゴ移動: カーゴごとに与えられた if-then ルールに基づいてカーゴが移動するが if-then ルールを満たさない場合は移動しない。また、複数のルールがある場合は順番に実施する。たとえば、前面に移動するルール1と上下左右前後の位置で一番重心が機体の中心に近づく方に移動するルール2がある場合、ルール1が実施できれば完了し、実施できなければルール2を実施する。なお、ルールは条件の厳しい方から実行するように設計する。
4. カーゴ交換: カーゴごとに与えられた if-then ルールに基づいてカーゴを交換する。たとえば、グループ単位で移動するカーゴはグループ単位で交換し、単体で移動するカーゴは単体で交換するが、if-then ルールを満たさない場合は交換しない。また、複数のルールがある場合は順番に実施する。たとえば、グループ単位で交換するルール1と単体で交換するルール2を与えられた場合、ルール1を実施して、それが実施できれば完了し、実施できなければルール2を実施する。
5. カーゴ移動・交換の終了判定: 同じサイズのカーゴがすべて配置されていなければ2に戻る。一方、それらがすべて配置され、カーゴが持つ if-then ルールに基づいて移動あるいは交換しても HTV の重心が機体の中心に近づくかない場合は1に戻る。そして、すべてのサイズのカーゴが配置された後、移動・交換をしても重心が改善されなければ終了する。



エージェント型カーゴレイアウトは 何が売りか？

前章で述べた提案システムにはどのような特徴があるのか？ それは次のようにまとめられる。

- **準最適解探索による速い計算**：複数種類からなるカーゴ配置は莫大な組合せがあり、分枝限定法に代表される従来手法では最適解の発見を目指すため莫大な計算時間がかかる。これに対し、提案技術では最適解を求めるのではなく、目標範囲に入る複数の局所解の1つを求めることに焦点を絞っている。つまり、各カーゴは自分のこと（自分の移動・交換可能な範囲）のみを考慮するため、最適解は保証されないが、制約を満たす準最適解を早く見出すことが可能となる。具体的には、提案システムではノートPCで1秒弱で計算できるが、分枝限定法では数日かかって計算できない。なお、制約を満たす解が存在しない場合は、制約を可能な限り満たして（同様に1秒弱で）計算を終了する。
- **自由度の高い前提**：カーゴレイアウト決定後のカーゴの重量変更、新たなカーゴの追加、到着遅れなどによるカーゴの除去の場合、従来の最適化技術では部分的にレイアウトを残して計算することが難しく、最初から全カーゴの配置を計算することが多い。これに対し、提案技術ではカーゴ単位の移動・交換で最適化するため、該当カーゴのみを修正すればよく、部分的にレイアウトを残した計算が可能となる。さらに、カーゴ単位でif-thenルールを与えることができるため、カーゴごとにさまざまな制約を付加でき、従来手法より実用性が高い。

NASA や ESA を超える AI 技術

我々の技術は NASA や ESA からみてどのような位置付けになるであろうか？ それについて議論する。スペースシャトルで物資を運搬していた時代においても、NASA はカーゴレイアウトシステムを自前で持つ

ておらず、カーゴレイアウトの計算はボーイング社に委託していた。そのため、配置結果を受け取るのに1カ月かかり²⁾、その期間内のカーゴ変更は認められない。一方、ESA の ATV に関しては、CAST というカーゴレイアウトシステム³⁾が開発されてきたが、カーゴレイアウト問題を混合整数計画問題（整数値（ここでは配置場所）と実数値（ここでは重心や重さ）の変数を両方扱う問題）として定式化しているため、基本的には計算量がかかり、打上げ4カ月前からのカーゴレイアウトの変更は禁止されている。

これに対し、提案システムは即時最適化が可能であることに加えて、カーゴ単位で制約を設定でき、カーゴレイアウト配置後にカーゴの変更に対応できることから、運用上、非常に有益な機能を有している。これは NASA や ESA の情報技術では達成できないことを達成していることを示している。即時最適化だけに着目しても、提案システムは1秒弱で計算できるため、廃棄物を入れたカーゴのレイアウトをISS内で計算できる。これは非常に重要で、すべての廃棄物がカーゴに搭載されるまではカーゴの正確な重量や重心は確定できないため、地上局にカーゴごとの重さや重心を伝えて計算する訳にはいかない。そのため、即時最適化は廃棄物のカーゴレイアウトには欠かせないのである。

この提案システムのように日本から発信するAI技術がNASAやESAを超えられる可能性は十分にある。本稿がそのような可能性に探究に少しでも役立てば幸いである。

参考文献

- 1) Takadama, K., Amatatsu, S., Nakasuka, S. and Shimohara, K. : Multiagent-based Layout System for a Pressurized Logistics Carrier in H-IIA Transfer Vehicle, The 7th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS'03) (2003).
- 2) Bi-lateral NASA / NASDA Pressurized Cargo Integration TIM for HTV (2003).
- 3) Bussolino, L., Fasano, G. and Novelli, A. : A Cargo Accommodation Problem for a Space Vehicle : The CAST Project, Operations Research in Space and Air, Kluwer Academic Publishers, pp.13-26 (2003).

(2015年4月19日受付)

高玉圭樹（正会員）■ keiki@inf.uec.ac.jp

1998年東京大学博士課程修了。博士（工学）。同年、国際電気通信基礎技術研究所（ATR）入所。2002年東京工業大学講師を経て、2006年電気通信大学助教授、2011年教授、現在に至る。