

論文の内容の要旨

論文題目 強化学習を用いたコンテナ船物流向け
多品目在庫管理に関する研究

氏 名 末次 浩詩

本論文は、コンテナ船物流向け多品目在庫システムにおいて、強化学習による在庫管理方策について論じたものである。

小売業の海外調達プライベートブランド（PB）商品において、海外から日本に自社で輸送する動きが増加する中、FCL（Full Container Load）によるコンテナ船輸送と賃貸型倉庫を特徴とするサプライチェーン費用の低減が喫緊の課題である。FCLによるコンテナ船輸送では、輸送量に対して階段状の輸送費用を持つ、多品目在庫システムであることが特徴である。また、賃貸型倉庫を利用する場合には、在庫保管量に対して非線形な在庫保管費用であることと、時間軸で動的に倉庫容量の変更が可能であることが特徴である。本論文では、コンテナ船輸送と賃貸型倉庫を前提とする多品目在庫システムにおけるサプライチェーン費用の低減に向けて、(1)非線形な輸送費用及び在庫保管費用のもとでの補充計画と、(2)動的な倉庫容量計画の立案手法を提案している。

(1)非線形な輸送費用及び在庫保管費用のもとでの補充計画の立案

多品目在庫システムにおける補充計画、すなわち同時補充問題とは、コンテナ輸送費用など商品間で共有される共通発注費用がある場合に在庫の補充方策を決定する問題である。共通発注費用を抑えるには、補充タイミングを商品間で合わせる協調的な補充方策が求められる。しかし、在庫コストや在庫切れによる機会損失とのバランスを考慮した最適解を求めるのは、商品数に応じて決定空間が指数的に増加するため計算量的に困難であること

が知られている。そのため、既存研究では明示的なルールベースの近似方策が用いられてきたが、需要のばらつきや商品間での相関といった需要特性によって適切な近似方策が異なること、そして線形な輸送費用や在庫費用といった限定的な取引条件のみを想定しているため、新たな取引条件に対して適用すると良い結果が得られないという課題があった。

そこで、本研究では、多様な取引条件に対して適用できる同時補充問題の強化学習による解法を提示する。同時補充問題を強化学習で解く場合には、高次元離散行動空間への対処が課題となる。高次元離散行動空間における強化学習は、連続行動空間での近似を用いる方法、行動の次元ごとの逐次的に行動を決定する方法などもこれまで提案されているが、本問題の特徴を踏まえ、商品ごとを独立したエージェントとするマルチエージェント強化学習を用いる。マルチエージェント強化学習での既存手法の多くは、行動価値をエージェントごとに分解して計算するのが一般的である。しかし、同時補充問題では、全体の費用に対して、各商品の補充数の相互作用が大きく、分割法で表現できない構造を持つ。このため、自商品以外の補充量の影響を互いに考慮するマルチエージェント強化学習手法である、Conditional Independent Q-Learner (C-IQL) を提案する。マルチエージェント環境下では、各エージェントに対して報酬の分配が必要となるが、グローバルな報酬分配の特徴を利用したヒューリスティックを導入することで、効率的により合計の行動価値が大きくなるジョイントアクションの探索を可能とした。数値実験により、C-IQL は複数の需要特性、及び、取引条件下で、既存方策同等以上の性能が得られることを実証している。

(2) 動的な倉庫容量計画の立案

多品目在庫システムでは、倉庫容量と補充方策を同時決定する解法はこれまでに提案されていない。しかし、倉庫容量を所与とした補充方策の解法は(1)の手法によって導くことが可能である。そこで、多品目在庫システムにおいて動的倉庫容量計画を求める手法として、第4章「費用推定モデルを用いた動的倉庫容量計画」では、倉庫容量を所与とした同時補充問題の解法として C-IQL を前提として、動的倉庫容量計画の立案手法を提案している。動的倉庫容量計画を得る上で、将来ありうる全ての需要水準及び倉庫容量の条件について C-IQL による補充方策を求めることは現実的ではないという課題に対し、ガウス過程回帰により未学習の条件における費用を推定し、推定した費用関数に基づいて動的倉庫容量計画を求める、という 2 段階の手法である。費用推定モデルの目的は、少ない学習データで精度の高い費用推定モデルを求めることであり、そのために必要な、予測誤差の正しい評価と適切なサンプリング戦略の実現において、Hybrid Cramer-Rao Bound (HCRB) による予測誤差評価の有効性を実証している。また、得られた費用推定モデルを用いた動的容量決定モデルにより、賃貸倉庫が持つ容量変更の柔軟性の経済価値を定量的に示している。特に、容量変更の柔軟性は、事業価値の期待値を向上させる以上に、事業リスクを大幅に低減する効果があることを示している。