

令和元年6月4日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01241

研究課題名(和文) 組合せ計量最適化モデリングと精度保証付き多目的近似アルゴリズムの設計

研究課題名(英文) Lexicographic optimization modeling and approximation algorithm design with performance guarantee for multihead weigher systems

研究代表者

軽野 義行 (Karuno, Yoshiyuki)

京都工芸繊維大学・機械工学系・准教授

研究者番号：80252542

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：反復的袋詰め操作を行う組合せ計量システムを対象として、多目的最適化モデルの構築及びそれらの数理特性、主に近似アルゴリズム設計の観点からの調査を行った。詰めるアイテムが単品種の場合と二品種の場合とともに、合計重量に関しては近似スキームが、また、合計重量と条件付き優先度関数に関しては定数近似アルゴリズムが存在することを示した。さらに、一袋あたりのアイテム個数に制約がある場合の最適化モデルを構築し、その制約と合計重量の関係を数理的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

組合せ計量システムの反復的袋詰め操作の最適化モデルに対して、本研究で得られた近似アルゴリズムは、それら自身の重要性に加えて、多目的組合せ最適化問題に対する新しい精度評価方法も与えている。また、世界中で稼働する類の製造システムについては、インターネットを介した相互連携が探られているので、数理モデリングの観点から本研究で明らかになった組合せ計量システムの包括的な数理特性は、今後の立上作業の効率化等に結び付けていくことが期待される。

研究成果の概要(英文)：We formulated operational issues of repetitive packaging by multihead weighers as lexicographic optimization problems, and investigated their mathematical structures so that approximation algorithms with some performance guarantee were obtained. We presented a polynomial time approximation scheme for optimizing the total weight of a mixture package of two types of items, and also showed that a constant factor approximation solution exists for the optimal total weight of a mixture package of two types of items and the conditionally maximum of the total priority both. Further, we treated a special case of the cardinality constrained packaging problem, and proposed a pseudo-polynomial time algorithm by utilizing a lexicographic bi-criteria structure.

研究分野：社会システム工学

キーワード：システム工学 モデル化 アルゴリズム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 多くのモノがインターネットに繋がれようとしていた。また、そのような社会的傾向は現在も、引き続き見受けられる。製造設備がインターネットに繋がれたとき、製造プロセスを常時モニタリングしてデータを蓄積し、異常があれば自動的に検知する、というのは狭義的ながら情報ネットワークの実際の活用形態の一つと言える。別の活用形態として、製造設備導入時の立上作業（特に、動作パラメータの調整）の遠隔化が考えられる。ある企業によって開発された製造設備が世界中で稼働しているようなケースでは、情報ネットワークの活用形態の一つとして、遠隔作業が検討されるのは自然な流れである。数理モデリングは、データから何らかの解釈を行い、有益な情報を取り出すための有効なアプローチの一つであり、製造設備から集められるデータもその適用対象となり得る。

(2) ある製造設備の適用可能性が広汎に渡る場合、製造設備の特性を包括的な観点から理解するための数理モデリングは可能であろうか。組合せ計量システムは、ピーマンを筆頭にスナック菓子や野菜サラダ等の食品、さらには錠剤、文房具、小型部品等を、定量で袋詰めするための設備である。このシステムは、国内のみならず海外でも利用が広がり始めていた。人的立上作業のためのインターフェース開発や、小規模システムの動作特性に関する調査観察については、一応幾つかの報告例があった。一方で、システムが詰めるアイテムの品種数や個数を考慮した場合の動作特性に関する調査は殆ど見られなかった。単品種のアイテムや個数自由の最適化モデルは、それら自体が実例に基づく重要なものである。しかしながら、集められるデータの一層効率的な活用のためには、数理モデリングにおけるより包括的な視点が望まれた。

2. 研究の目的

組合せ計量システムの内容量最適化モデルと厳密アルゴリズムの設計手法がある程度確立し、近似アルゴリズムの設計手法についても展開が進みつつあった。組合せ計量システムは世界規模での利用が広がり始めていた製造設備の一つである。インターネットを介したデータ相互連携の一層の強化のために、将来的な近似アルゴリズムの設計手法の検討においては、多様な用途の組合せ計量システムを包括的に表現する最適化モデルの構築とその数理構造の解明が必要であった。本研究では、多目的近似アルゴリズムの設計と精度評価の観点から、包括的最適化モデルの構築及びその数理構造の解明を目的とした。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、まず明らかにすべき事項として (A) 二目的部分最適化モデルの再定義及び動的計画法に基づいた厳密アルゴリズムの設計、(B) 単品種の部分最適化モデルに対する近似精度保証、特に第二規準に対する近似精度の解析、(C) 二品種の部分最適化モデルに対する近似精度保証、単品種の場合と同様、特に第二規準の近似精度の解析、を設定して、それぞれ理論解析を行った。その後の研究の進展に合わせて、他に明らかにすべき事項として計画していたものを明確化及び具体化し、(D) 派生モデルとしての有向二部グラフ上のアイテム収集問題に対する数学的構造の特徴付け、(E) 詰めるアイテム個数を考慮した部分最適化モデルの構築、等を実施した。幾つかの検討事項に対しては、理論解析のみならず、アルゴリズムを実装しての計算実験による性能評価も行った。研究成果の発表は、主に学術論文や学会発表の場で行ったが、依頼のあった招待講演、模擬授業、寄稿等によっても行った。

4. 研究成果

(1) 数理モデリングの有用性を確認し、近似アルゴリズムの設計技法を確立していくための最初の成果として、合計重量と優先度という二目的からなる単品種アイテムの部分最適化モデルに対して、定数精度保証を持つ近似解の存在を明らかにした。アルゴリズムはグリーディな発見的な手法であり、低次の多項式的計算手間で動作する。なお、優先度と最適値は、合計重量が最悪値を取る解によってしか達成されない。スケーリングやシフティングを用いることによって、ある種の数学的等価性を保存する別のインスタンスを対象にして、多目的近似精度を議論することがあるが、先述の理由から今回はそのような評価方法が適切とは言えない。ここでは、辞書式二目的最適化モデルとしての最適解が達成する優先度とを基準にする評価方法を新しく導入している。

(2) 合計重量と優先度という二目的からなる二品種アイテムの部分最適化モデルに対して、各品種とも複数のアイテムを詰めるという前提で、定数精度保証を持つ近似解の存在を明らかにした。アルゴリズムは再びグリーディな発見的な手法である。一方で、低次の多項式的計算手間で動作するものの、作成解が条件を満たさないならば逐次修正を加えていくというアルゴリズムである。そのため、複数の解の精度保証をそれらが構成された条件を考慮しながら評価する必要があった。単品種の場合と比べて解析はやや複雑である。実際に、研究の初期段階では優先度とに対して、インスタンス依存の精度保証が得られたただけであった。なお、辞書式二目的最適化モデルを基本としながら、第一規準の合計重量に誤差を許すかのような表現に違和感を持たれるかもしれない。新しい評価方法が無用の誤解を受けないよう、用語の洗練が今後必要である。

(3) 単品種アイテムの部分和最適化モデルを対象として、任意の正数 ϵ に対して、合計重量の近似比が高々 $1+\epsilon$ となるようにしながら、発見的に優先度最和の最適化を図る近似アルゴリズムを設計した。動的計画法に基づく厳密アルゴリズムをベースにしたその近似アルゴリズムの計算手間は、アイテム数と誤差パラメータの逆数 $1/\epsilon$ に関して多項式的である。このようなアルゴリズム設計は、多項式時間近似スキームの技法に沿うものである。また、計算実験による性能評価も併せて行った。近似合計重量が許容されている誤差まで達することはなく、むしろ最適値に近い、また、発見的な優先度改善の効果によって、アイテムのシステム滞留時間が短縮される、等の観察結果を得た。さらに、二品種アイテムの部分和最適化モデルに対しても、合計重量の近似比が高々 $1+\epsilon$ となり、計算手間がアイテム数と誤差パラメータの逆数 $1/\epsilon$ に関して多項式的となる近似アルゴリズムを設計した。

(4) 部分和最適化モデルの一つの派生モデルとして、有向二部グラフ上のアイテム収集問題を考察した。その基本形は、プリント回路基板におけるビア削減数最大化のために考案された反転（スイッチング）グラフ問題である。本研究では、先行文献でモデル考案者が言及していた問題のある性質を数学的構造として明確に特徴付けると共に、その特徴付けに基づいてグリーディな発見的アルゴリズムを設計した。また、その特徴付けを近傍探索でも活用して、擬似焼き鈍し法を適用した発見的アルゴリズムを設計した。計算実験において、それらの発見的アルゴリズムはベンチマークインスタンスの最適解を高速に得ることを確認した。また、ランダムに生成したインスタンスに対しても良好な解を得ていることを観察した。この派生モデルは、袋詰めされる食品に関する別の適用が可能かもしれない、今後も検討を継続する。

(5) 組合せ計量システムが詰める食品として、ピーマンのような食品とスナック菓子のような食品では性質が異なる。すなわち、ピーマンのような食品では一袋当たりの重量に加えて個数もその品質に関与する。本研究では、個数制約を考慮した通常の部分和最適化モデルの考察に加えて、第二規準を個数制約に対応させた辞書式二目的最適化モデルを構築した。各アイテムの重量がある範囲に収まる場合、辞書式二目的最適化モデルの最適解が規定の個数制約を満足することを証明すると共に、そのような最適解を擬似多項式的計算手間で求める動的計画法に基づいた厳密アルゴリズムを設計した。なお、通常の部分和最適化モデルでは、各アイテムの重量に特別な仮定を設ける必要がない。一方で、厳密アルゴリズムの計算手間は、辞書式二目的最適化モデルのその規定個数倍のオーダーとなる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Yoshiyuki Karuno, Seiya Tanaka, Iterative improvement approaches for collecting weighted items in directed bipartite graphs, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol.12, 2018, DOI:10.1299/jamdsm.2018jamdsm0051

Yoshiyuki Karuno, Seiya Tanaka, Cooperative item collecting problems in directed bipartite structures, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol.11, 2017, DOI:10.1299/jamdsm.2017jamdsm0025

Yoshiyuki Karuno, Ryo Saito, Heuristic algorithms with rounded weights for a combinatorial food packing problem, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol.11, 2017, DOI:10.1299/jamdsm.2017jamdsm0003

〔学会発表〕(計 12 件)

Yoshiyuki Karuno, Oki Nakahama, Heuristic performance of greedy heuristic solutions for a lexicographic bi-criteria mixture packing of two types of items with bounded weights, International Symposium on Scheduling 2019 (ISS 2019), 2019

Yoshiyuki Karuno, Oki Nakahama, Pseudo-polynomial time algorithms for producing cardinality constrained packages by multi-head weighers, Joint 10th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 19th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2018), 2018

Yoshiyuki Karuno, Oki Nakahama, A requirement for the number of items in a package produced by multi-head weighers, 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2018), 2018

Yoshiyuki Karuno, Oki Nakahama, Performance of a heuristic total weight in combinatorial mixture packaging of two types of items, The 6th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering (ICIAE 2018), 2018

Seiya Tanaka, Yoshiyuki Karuno, Compounding procedure for a weighted item collecting problem with a cost penalty term in directed bipartite structures, The 6th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering (ICIAE 2018), 2018

軽野義行, 田中聖也, 有向二部グラフ上の重み付きアイテム収集問題に対する近傍探索法,

日本機械学会生産システム部門研究発表講演会 2018 , 2018

Yoshiyuki Karuno, Oki Nakahama, Greedy heuristic performance for combinatorial mixture packaging of two types of items with bounded weights, The 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21 Hiroshima), 2017

Yoshiyuki Karuno, Optimization modeling with further requirements in objective functions: Examples of Lexicographic optimization problems (Invited Talk), International Symposium on Scheduling 2017 (ISS 2017), 2017

Yoshiyuki Karuno, Seiya Tanaka, Weighted item collecting in directed bipartite structure with a reversing cost penalty, The 5th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering (ICIAE 2017), 2017

Yoshiyuki Karuno, Ryo Saito, Empirical performance of lexicographic bi-criteria solutions during an operating run of repetitive packaging by a combinatorial weigher, The 5th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering (ICIAE 2017), 2017

田中聖也, 軽野義行, An item collecting problem with arc reversing in a directed bipartite graph, 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会 2017 , 2017

齊藤稜, 軽野義行, An approximation scheme for a packing problem in automatic combination weighers, 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会 2017 , 2017

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

軽野義行, 組合せ計量機による反復的袋詰め操作の数理モデル, 京都工芸繊維大学情報科学センター広報, No.37, 2019, 18-21

6 . 研究組織

(1)研究分担者 なし