

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7591007号  
(P7591007)

(45)発行日 令和6年11月27日(2024.11.27)

(24)登録日 令和6年11月19日(2024.11.19)

(51)国際特許分類 F I  
G 0 6 Q 10/047 (2023.01) G 0 6 Q 10/047  
G 0 6 Q 10/083 (2024.01) G 0 6 Q 10/083

請求項の数 10 (全27頁)

(21)出願番号	特願2022-120950(P2022-120950)	(73)特許権者	000005108 株式会社日立製作所 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
(22)出願日	令和4年7月28日(2022.7.28)	(74)代理人	110000176 弁理士法人一色国際特許事務所
(65)公開番号	特開2024-17959(P2024-17959A)	(72)発明者	木村 幸代 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内
(43)公開日	令和6年2月8日(2024.2.8)	(72)発明者	小川 純 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内
審査請求日	令和6年1月15日(2024.1.15)	(72)発明者	杉田 悠介 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内
		(72)発明者	山岡 雅直

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 輸送計画作成支援装置、及び輸送計画作成支援方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

複数の車両が各荷物の配送を行う輸送計画の作成を支援する装置であって、  
前記配送における制約条件であって逸脱が許容されない第1の制約条件と、前記配送における複数の評価基準のそれぞれに基づく各評価値に関する制約条件であって逸脱が許容される第2の制約条件とを記憶する記憶部、及び、  
前記第1の制約条件を満たしつつ、前記評価基準に基づく評価値が最適化されるような、各前記車両の配送の各経路の組み合わせを、配送経路候補として、前記複数の評価基準のそれぞれについて作成する配送経路候補作成処理と、  
各前記評価基準についての前記配送経路候補の評価値、及び、前記第2の制約条件が満たされる際に最小となる制約条件用関数を項として含む目的関数に関して、前記各車両の各配送の経路の利用有無をスピンとし、前記制約条件用関数における変数間の感応度を前記スピンの間の相互作用の強度として設定したイジングモデルを演算する最適配送経路作成処理と、  
演算の結果に基づき、前記各車両の各経路の利用有無を示す情報を出力装置に出力する結果出力処理とを実行する演算部を備える、  
輸送計画作成支援装置。

10

【請求項2】

前記記憶部は、前記第1の制約条件として、前記車両の種類、前記荷物の前記車両による積載量の制限、又は前記配送にかかる時間若しくは距離に関する制約条件を記憶し、前

20

記第 2 の制約条件として、前記評価値の目標値に関する制約条件を記憶し、

前記演算部は、

前記配送経路候補作成処理において、前記車両の種類、前記荷物の前記車両による積載量の制限、又は前記配送にかかる時間若しくは距離に関する制約条件を満たしつつ、前記評価基準に基づく評価値が最適化されるような、各前記車両の配送の各経路の組み合わせを、配送経路候補として、前記複数の評価基準のそれぞれについて作成し、

前記最適配送経路作成処理において、各前記評価基準についての前記配送経路候補の評価値、及び、前記評価値の前記目標値からの乖離が最小となる際に最小となる制約条件用関数を項として含む目的関数に関する前記イジングモデルを演算する、

請求項 1 に記載の輸送計画作成支援装置。

10

【請求項 3】

前記記憶部は、前記第 2 の制約条件として、前記配送における車両の数の目標値に関する制約条件を記憶し、

前記演算部は、前記最適配送経路作成処理において、さらに、前記配送経路候補における車両の数の前記目標値からの乖離が最小となる際に最小となる制約条件用関数、を項として含む目的関数に関する前記イジングモデルを演算する、

請求項 1 に記載の輸送計画作成支援装置。

【請求項 4】

前記演算部は、前記最適配送経路作成処理において、さらに、前記配送経路候補における車両の数を項として含む目的関数に関する前記イジングモデルを演算する、

20

請求項 1 に記載の輸送計画作成支援装置。

【請求項 5】

前記演算部は、前記最適配送経路作成処理において、各前記評価基準についての、当該評価基準に応じて設定された重みが付与された前記配送経路候補の評価値を項として含む目的関数に関する前記イジングモデルを演算する、

請求項 1 に記載の輸送計画作成支援装置。

【請求項 6】

複数の車両が各荷物の配送を行う輸送計画の作成を支援する方法であって、  
情報処理装置が、

前記配送における制約条件であって逸脱が許容されない第 1 の制約条件と、前記配送における複数の評価基準のそれぞれに基づく各評価値に関する制約条件であって逸脱が許容される第 2 の制約条件とを記憶し、

30

前記第 1 の制約条件を満たしつつ、前記評価基準に基づく評価値が最適化されるような、各前記車両の配送の各経路の組み合わせを、配送経路候補として、前記複数の評価基準のそれぞれについて作成する配送経路候補作成処理と、

各前記評価基準についての前記配送経路候補の評価値、及び、前記第 2 の制約条件が満たされる際に最小となる制約条件用関数を項として含む目的関数に関して、前記各車両の各配送の経路の利用有無をスピンとし、前記制約条件用関数における変数間の感応度を前記スピンの間の相互作用の強度として設定したイジングモデルを演算する最適配送経路作成処理と、

40

演算の結果に基づき、前記各車両の各経路の利用有無を示す情報を出力装置に出力する結果出力処理とを実行する、

輸送計画作成支援方法。

【請求項 7】

前記情報処理装置が、

前記第 1 の制約条件として、前記車両の種類、前記荷物の前記車両による積載量の制限、又は前記配送にかかる時間若しくは距離に関する制約条件を記憶し、前記第 2 の制約条件として、前記評価値の目標値に関する制約条件を記憶し、

前記配送経路候補作成処理において、前記車両の種類、前記荷物の前記車両による積載量の制限、又は前記配送にかかる時間若しくは距離に関する制約条件を満たしつつ、前記

50

評価基準に基づく評価値が最適化されるような、各前記車両の配送の各経路の組み合わせを、配送経路候補として、前記複数の評価基準のそれぞれについて作成し、

前記最適配送経路作成処理において、各前記評価基準についての前記配送経路候補の評価値、及び、前記評価値の前記目標値からの乖離が最小となる際に最小となる制約条件用関数を項として含む目的関数に関する前記イジングモデルを演算する、

請求項 6 に記載の輸送計画作成支援方法。

#### 【請求項 8】

前記情報処理装置が、

前記第 2 の制約条件として、前記配送における車両の数の目標値に関する制約条件を記憶し、

前記最適配送経路作成処理において、さらに、前記配送経路候補における車両の数の前記目標値からの乖離が最小となる際に最小となる制約条件用関数、を項として含む目的関数に関する前記イジングモデルを演算する、

請求項 6 に記載の輸送計画作成支援方法。

#### 【請求項 9】

前記情報処理装置が、

前記最適配送経路作成処理において、さらに、前記配送経路候補における車両の数を項として含む目的関数に関する前記イジングモデルを演算する、

請求項 6 に記載の輸送計画作成支援方法。

#### 【請求項 10】

前記情報処理装置が、

前記最適配送経路作成処理において、各前記評価基準についての、当該評価基準に応じて設定された重みが付与された前記配送経路候補の評価値を項として含む目的関数に関する前記イジングモデルを演算する、

請求項 6 に記載の輸送計画作成支援方法。

#### 【発明の詳細な説明】

#### 【技術分野】

#### 【0001】

本発明は、輸送計画作成支援装置、及び輸送計画作成支援方法に関する。

#### 【背景技術】

#### 【0002】

グローバル化によって輸送業務がより複雑化しているサプライチェーンにおいて、その効率化はより重要な問題となってきた。サプライチェーンで行われる輸送業務の数理的最適化は、しばしば、所定条件下で所望のパラメータを最大または最小とする解を探索する、数理計画法に基づく最適化問題を解くことによって行われる。

#### 【0003】

数理計画法の解法としては、例えば、特許文献 1 には、数理計画計算装置が開示されている。具体的には、理計画問題が入力されると、解探索方針最適化手段が遺伝的アルゴリズムを用いて、解探索方針を示す染色体を有する個体を生成してこれらの個体で個体群が形成されることが記載されている。そして、この個体群は、解探索手段に渡され、解探索手段は、個体群内の各個体の染色体で示された解探索方針に従って数理計画問題の解を探索し、解候補を作成し、解候補を解候補群として、解探索方針最適化手段し、解探索方針最適化手段は、解候補群の各解候補の適応度値を求め、次の世代の解候補を探索する必要がなければ、適応度値の最も良い解候補を、この数理計画問題の解とすることが記載されている。

#### 【0004】

また、特許文献 2 には、輸送計画装置が、それぞれが納品作業及び集荷作業を含む複数のオーダと、該複数のオーダそれぞれの納品作業が実行される拠点及び集荷作業が実行される拠点と、を示すオーダ情報と、納品作業と、集荷作業と、納品作業及び前記集荷作業を 1 つの作業とみなした納品集荷作業と、のそれぞれの作業時間を示す作業時間情報と、

10

20

30

40

50

を保持し、複数のオーダーに含まれる納品作業と集荷作業との実行順序を示す輸送作業順案を生成し、同一の拠点において連続する納品作業及び集荷作業を納品集荷作業とみなし、作業時間情報を参照して、輸送作業順序案に含まれる納品作業、集荷作業、及び納品集荷作業の作業時間を特定することが記載されている。

【0005】

一方、サプライチェーンの最適化においては解候補が爆発的に多くなることもあり、その場合、スーパーコンピュータや量子コンピュータなど相応の計算能力を有した計算機でなければ、当該問題を実用的な時間内に解くことが難しくなることがある。

【0006】

量子コンピュータに関連する従来技術としては、例えば、全数探索を必要とするような逆問題や組み合わせ最適化問題に対して高速演算を可能にする計算機に関し、スピンを演算における変数とし、解こうとする問題をスピン間相互作用とスピンごとに作用する局所場で設定し、また、時刻  $t = 0$  において外部磁場により全スピンを一方向に向かせ、時刻  $t =$  で外部磁場がゼロになるように外部磁場を徐々に小さくし、また、各スピンは時刻  $t$  における各サイトの外部磁場及びスピン間相互作用のすべての作用で決まる有効磁場に従い向きが定まるとして時間発展させ、その際、スピンの向きが有効磁場に完全に揃うのではなく、量子力学的に補正された向きとすることにより、系が基底状態をほぼ維持するようにする技術（特許文献3参照）などが提案されている。

【0007】

そして、特許文献4には、量子コンピュータの一方式であるアニーリングマシンを用いて配送計画を作成する方法として、複数の配送パターンを作成するステップと、複数の配送パターンをアニーリングマシンに入力して算出した複数の解に基づき、複数の配送パターンから指定数の配送パターンに絞り込むステップと、指定数の配送パターンから選択した配送パターンに基づき配送計画を作成するステップとを含む方法が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

【文献】特開平10-055439号公報

【文献】特開2020-181282号公報

【文献】国際公開第2016/157333号

【文献】特開2021-111276号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

しかしながら、輸送経路及びその輸送に係る制約が多様多様に存在するようなグローバルサプライチェーンにアニーリングの手法を適用すると、定式化すべき数式が冗長化して、守るべき制約に違反する可能性が高くなる。一方で、数理計画法のような手法では演算に膨大な時間がかかることが予想される。このように、サプライチェーンが複雑化すると、輸送計画の作成時間と作成された計画の妥当性とを両立することがより難しくなるという問題があった。

【0010】

本発明は、このような事情に鑑みてなされたものであり、その目的は、多くの制約を有する輸送計画を、それら制約をその内容に応じて遵守しつつ迅速に作成することを支援することが可能な輸送計画作成支援装置、及び輸送計画作成支援方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0011】

上記課題を解決するための本発明の一つは、複数の車両が各荷物の配送を行う輸送計画の作成を支援する装置であって、前記配送における制約条件であって逸脱が許容されない第1の制約条件と、前記配送における複数の評価基準のそれぞれに基づく各評価値に関す

10

20

30

40

50

る制約条件であって逸脱が許容される第2の制約条件とを記憶する記憶部、及び、前記第1の制約条件を満たしつつ、前記評価基準に基づく評価値が最適化されるような、各前記車両の配送の各経路の組み合わせを、配送経路候補として、前記複数の評価基準のそれぞれについて作成する配送経路候補作成処理と、各前記評価基準についての前記配送経路候補の評価値、及び、前記第2の制約条件が満たされる際に最小となる制約条件用関数を項として含む目的関数に関して、前記各車両の各配送の経路の利用有無をスピンとし、前記制約条件用関数における変数間の感応度を前記スピンの間の相互作用の強度として設定したイジングモデルを演算する最適配送経路作成処理と、演算の結果に基づき、前記各車両の各経路の利用有無を示す情報を出力装置に出力する結果出力処理とを実行する演算部を備える、輸送計画作成支援装置である。

10

【発明の効果】

【0012】

本発明によれば、多くの制約を有する輸送計画を、それら制約をその内容に応じて遵守しつつ迅速に作成することを支援することができる。

上記した以外の構成及び効果等は、以下の実施形態の説明により明らかにされる。

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図1】本実施形態に係る輸送計画作成支援システムの構成の一例を示す図である。

【図2】本実施形態の輸送計画作成支援装置が備えるハードウェア及び機能の一例を示す図である。

20

【図3】車両情報テーブルのデータ構成の一例を示す図である。

【図4】拠点情報テーブルのデータ構成の一例を示す図である。

【図5】注文情報テーブルのデータ構成の一例を示す図である。

【図6】移動時間情報テーブルのデータ構成の一例を示す図である。

【図7】コスト情報テーブルのデータ構成の一例を示す図である。

【図8】評価基準情報テーブルのデータ構成の一例を示す図である。

【図9】スピン系の基底状態を得るためのタイミングチャートを示す図である。

【図10】イジングモデルにおける解法の一例を説明するフロー図である。

【図11】輸送計画作成支援処理の一例を説明するフロー図である。

【図12】評価基準が配送コストである場合の、第1の制約条件を満たしかつ配送コストを最適化する配送経路候補を決定する処理の一例を示すフロー図である。

30

【図13】配送経路候補の例を示す図である。

【図14】最適配送経路作成処理の詳細を説明するフロー図である。

【図15】最適配送経路作成部が取得するデータの一例を示す図である。

【図16】最適配送経路の一例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0014】

<アニーリングマシンについて>

上述の特許文献3にも示すように、本出願人は量子コンピューティング技術を開発し、例えば、ビッグデータに基づく全数探索問題（組合せ最適化問題の概念含む）における諸問題の解決を図ってきた。

40

【0015】

こうした全数探索問題に対して、一般的には量子コンピュータへの期待が大きい。量子コンピュータは、量子ビットと呼ばれる基本素子からなり“0”と“1”を同時に実現する。そのためすべての解候補を初期値として同時に計算可能であり、全数探索を実現しうる可能性を持っている。しかし、量子コンピュータは全計算時間に亘って量子コヒーレンスを維持する必要がある。

【0016】

こういった中で注目されるようになってきたのが断熱量子計算と呼ばれる手法である（参考文献：E. Farhi, et al., "A quantum adiabati

50

c evolution algorithm applied to random instances of an NP-complete problem," Science 292, 472 (2001).)。この方法は、ある物理系の基底状態が解になるように問題を変換し、基底状態を見つけることを通して解を得ようとするものである。

【0017】

問題を設定した物理系のハミルトニアンを  $H^p$  とする。但し、演算開始時点ではハミルトニアンを  $H^0$  とするのではなく、それとは別に基底状態が明確で準備しやすい別のハミルトニアン  $H^0$  とする。次に十分に時間を掛けてハミルトニアンを  $H^0$  から  $H^p$  に移行させる。十分に時間を掛ければ系は基底状態に居続け、ハミルトニアン  $H^p$  の基底状態が得られる。これが断熱量子計算の原理である。計算時間を  $\tau$  とすればハミルトニアンは式(1)となり、

10

[式1]

$$\hat{H}(t) = \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \hat{H}_0 + \frac{t}{\tau} \hat{H}_p$$

20

式(2)のシュレディンガー方程式に基づいて時間発展させて解を得る。

【0018】

[式2]

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = \hat{H}(t) |\psi(t)\rangle$$

30

断熱量子計算は全数探索を必要とする問題に対しても適用可能で、一方向性の過程で解に到達する。しかし、計算過程が式(2)のシュレディンガー方程式に従う必要があるならば、量子コンピュータと同様に量子コヒーレンスの維持が必要になる。

【0019】

但し、量子コンピュータが1量子ビットあるいは2量子ビット間に対するゲート操作を繰り返すものであるのに対して、断熱量子計算は量子ビット系全体に亘って一斉に相互作用させるものであり、コヒーレンスの考え方が異なる。

【0020】

例えば、ある量子ビットへのゲート動作を考えてみる。この時、もしその量子ビットと他の量子ビットとで相互作用があれば、それはデコヒーレンスの原因になるが、断熱量子計算ではすべての量子ビットを同時に相互作用させるので、この例のような場合にはデコヒーレンスにならない。この違いを反映して断熱量子計算は量子コンピュータに比べてデコヒーレンスに対して頑強であると考えられている。

40

【0021】

以上述べたように、断熱量子計算は全数探索を必要とするような難問に対して有効である。そして、スピンを演算における変数とし、解こうとする問題をスピン間相互作用とスピンごとに作用する局所場で設定する。

【0022】

時刻  $t = 0$  において外部磁場により全スピンを一方向に向かせ、時刻  $t = \tau$  で外部磁場がゼロになるように外部磁場を徐々に小さくする。

50

## 【 0 0 2 3 】

各スピンは、時刻  $t$  における各サイトの外部磁場及びスピン間相互作用のすべての作用で決まる有効磁場に従い、向きが定まるとして時間発展させる。

## 【 0 0 2 4 】

その際、スピンの向きが有効磁場に完全に揃うのではなく、量子力学的に補正された向きとすることにより、系が基底状態をほぼ維持するようにする。

## 【 0 0 2 5 】

また、時間発展の際に各スピンを元の向きに維持する項（緩和項）を有効磁場に加え、解の収束性を向上させる。

以上を前提に、本発明の実施形態について図面を用いて詳細に説明する。

10

## 【 0 0 2 6 】

< 輸送計画作成支援システム >

図 1 は、本実施形態に係る輸送計画作成支援システム 1 の構成の一例を示す図である。同図に示すように、輸送計画作成支援システム 1 は、輸送計画作成支援装置 1 0 0 と、1 又は複数のユーザ端末 2 0 0 とを含んで構成される。

## 【 0 0 2 7 】

輸送計画作成支援装置 1 0 0 と各ユーザ端末 2 0 0 との間は、例えば、インターネット、LAN (Local Area Network)、WAN (Wide Area Network)、又は専用線等の有線

又は無線の通信ネットワーク 1 0 により通信可能である。

20

## 【 0 0 2 8 】

輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、所定の出発地（集荷拠点）から到着地（荷卸拠点）への所定の荷物の配送が指定されている注文を多数受注している輸送事業者において、各車両（トラック等の配送車両）がそれらの配送業務を種々の制約条件を満たしつつ行う輸送計画の作成を支援する情報処理装置である。

## 【 0 0 2 9 】

本実施形態では、輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、以下に説明するように、断熱量子計算を行うアニーリングマシンを含んで構成されているものとするが、勿論これに限定するものではなく、組合せ最適化問題を本発明の輸送計画作成支援方法に沿って適宜に解くことが可能なものであればいずれも適用可能である。なお、アニーリングマシンの概要は特許文献 3 に基づき既に述べたとおりであり、その具体的な構成や動作等の詳細については適宜省略する（以下同様）。

30

## 【 0 0 3 0 】

なお、輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、アニーリング方式において電子回路（デジタル回路など）で実装するハードウェアだけでなく、超伝導回路などで実装されてもよい。また、輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、アニーリング方式以外の方式にてイジングモデルを実現するハードウェアを備えていてもよい。この方式は、例えばレーザーネットワーク方式（光パラメトリック発振）・量子ニューラルネットワークなどである。また、前述した通り一部の考え方が異なるものの、イジングモデルで行う計算をアダマールゲート、回転ゲート、制御 NOT ゲートといったゲートで置き換えた量子ゲート方式においても、本発明を実現することができる。

40

## 【 0 0 3 1 】

次に、ユーザ端末 2 0 0 は、輸送計画作成支援装置 1 0 0 に輸送計画の作成を依頼し、輸送計画作成支援装置 1 0 0 により作成された輸送計画の情報を表示する情報処理装置である。

## 【 0 0 3 2 】

このユーザ端末 2 0 0 のユーザは、例えば、複数の車両による荷物の輸送業務を管理する輸送事業者である。各車両は、その最初の出発地から最終的な到着地に至るまでに、複数の集荷拠点及び荷卸し拠点を經由することで、一度に複数の荷物の配送業務を行うこともある。

50

## 【 0 0 3 3 】

< 輸送計画作成支援装置 >

図 2 は、本実施形態の輸送計画作成支援装置 1 0 0 が備えるハードウェア及び機能の一例を示す図である。なお、ユーザ端末 2 0 0 も、同様のハードウェアを備える。

## 【 0 0 3 4 】

まず、輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、記憶部 1 0 1、メモリ 1 0 3、演算部 1 0 4、および通信部 1 0 5 の各ハードウェアを備える。

## 【 0 0 3 5 】

記憶部 1 0 1 は、SSD (Solid State Drive) やハードディスクドライブなど適宜な不揮発性記憶素子で構成される。

## 【 0 0 3 6 】

メモリ 1 0 3 は、RAM (Random Access Memory) などの揮発性記憶素子で構成される。

## 【 0 0 3 7 】

演算部 1 0 4 は、記憶部 1 0 1 に保持されるプログラム 1 0 2 をメモリ 1 0 3 に読み出すなどして実行し装置自体の統括制御を行なうとともに各種判定、演算及び制御処理を行なう。演算部 1 0 4 は、例えば、CPU (Central Processing Unit)、DSP (Digital Signal Processor)、GPU (Graphics Processing Unit)、FPGA (Field-Programmable Gate Array) である。

## 【 0 0 3 8 】

通信部 1 0 5 は、通信ネットワーク 1 0 と接続してユーザ端末 2 0 0 との通信処理を担う。通信部 1 0 5 は、例えば、NIC (Network Interface Card)、無線通信モジュール、USB (Universal Serial Interface) モジュール、又はシリアル通信モジュールである。

## 【 0 0 3 9 】

なお、輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、ユーザからのキー入力や音声入力を受け付ける入力装置、又は、処理データの表示を行うディスプレイ等の出力装置、を更に備えていてもよい。

## 【 0 0 4 0 】

次に、輸送計画作成支援装置 1 0 0 が備える機能について説明する。

## 【 0 0 4 1 】

図 2 に示すように、輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、配送経路候補作成部 1 1 1、最適配送経路作成部 1 1 2、及び結果出力部 1 1 3 を備える。

## 【 0 0 4 2 】

配送経路候補作成部 1 1 1 は、配送における制約条件であって逸脱が許容されない制約条件 (以下、第 1 の制約条件という) を満たしつつ、所定評価基準に基づく評価値が最大となるような、各車両の配送の各経路の組み合わせを、配送経路候補として、複数の評価基準のそれぞれについて作成する。なお、評価基準の詳細は後述する。

## 【 0 0 4 3 】

最適配送経路作成部 1 1 2 は、各評価基準についての配送経路候補の評価値、及び、上記各評価基準に基づく各評価値に関する制約条件であって逸脱が許容される制約条件 (以下、第 2 の制約条件という) が満たされる際に最小となる制約条件用関数、を項として含む目的関数に関して、各車両の各配送の経路の利用 (採用) 有無をスピンとし、制約条件用関数における変数間の感応度をスピン間の相互作用の強度として設定したイジングモデル 4 0 0 を演算する。イジングモデル 4 0 0 の詳細は、後述する。

## 【 0 0 4 4 】

結果出力部 1 1 3 は、最適配送経路作成部 1 1 2 の演算の結果に基づき、各車両の各経路の利用有無を示す情報 (すなわち輸送計画に関する情報) を輸送計画作成支援装置 1 0 0 又はユーザ端末 2 0 0 の出力装置に出力する。

## 【 0 0 4 5 】

次に、輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、車両情報テーブル 3 1 0、拠点情報テーブル 3

10

20

30

40

50

20、注文情報テーブル330、移動時間情報テーブル340、コスト情報テーブル350、評価基準情報テーブル360、及び配送経路候補情報テーブル370の各テーブル(データベース)を記憶する。

【0046】

車両情報テーブル310は、輸送業務を行う各車両及び各車両による配送上の負担に関する制約の情報を記憶している。

【0047】

拠点情報テーブル320は、輸送業務において各車両が荷物の集荷及び荷卸しを行う拠点及び各拠点の制約条件に関する情報を記憶している。拠点情報テーブル320は、不図示の地図情報と対応づけられており、輸送計画作成支援装置100は、拠点間の距離(車両の移動距離)を算出することができる。

10

【0048】

注文情報テーブル330は、遂行が要求されている各注文に関する情報を記憶している。本実施形態において、1つの注文は、ある量の荷物の、集荷拠点から荷卸し拠点への配送であるものとする。

【0049】

移動時間情報テーブル340は、車両による拠点間の移動時間に関する情報を記憶している。

【0050】

コスト情報テーブル350は、配送に係るコストに関する情報を記憶している。

20

【0051】

評価基準情報テーブル360は、各車両の配送に関する評価基準及びその評価値の算出方法の情報を記憶している。

【0052】

配送経路候補情報テーブル370は、最適配送経路作成部112が算出した配送経路候補等の情報を記憶する。

【0053】

次に、各テーブルの詳細を説明する。

【0054】

(車両情報テーブル)

図3は、車両情報テーブル310のデータ構成の一例を示す図である。車両情報テーブル310は、各車両の車両ID311、各車両の最長稼働時間312(配送業務を行うことができる時間の最大値)、各車両の最長稼働距離313(配送可能な距離の最大値)、各車両の荷物の最大容量積載量314(荷物の容量上の制限)、及び、各車両の荷物の最大重量積載量315(荷物の重量上の制限)の各データを有する。

30

【0055】

(拠点情報テーブル)

図4は、拠点情報テーブル320のデータ構成の一例を示す図である。拠点情報テーブル320は、各拠点の拠点ID321、各拠点の稼働時間帯322、各拠点の位置324(位置情報等。拠点間の距離を算出するため等に用いられる)、各拠点に進入することが可能な種類の車両である進入可能車両325の各データを有する。

40

【0056】

(注文情報テーブル)

図5は、注文情報テーブル330のデータ構成の一例を示す図である。注文情報テーブル330は、各注文の注文ID331、各注文における荷物の配送量(荷物量332)、各注文における荷物の集荷拠点333、各注文における荷物の荷卸し拠点334、集荷拠点における集荷可能時間帯335、及び、荷卸し拠点における荷卸し可能時間帯336の各データを有する。

【0057】

このように、車両情報テーブル310、拠点情報テーブル320、及び注文情報テーブ

50

ル 3 3 0 には、車両、荷物、又は配送の負担に関する制約条件が設定されている。すなわち、これらの制約条件は第 1 の制約条件であり、荷物の配送業務においてその逸脱が許容されない、厳しい制約条件である。

【 0 0 5 8 】

( 移動時間情報テーブル )

図 6 は、移動時間情報テーブル 3 4 0 のデータ構成の一例を示す図である。移動時間情報テーブル 3 4 0 は、各配送における配送元の拠点 3 4 1、各配送における配送先の拠点 3 4 2、及び、各配送における車両の移動時間 3 4 3 の各データを有する。

【 0 0 5 9 】

( コスト情報テーブル )

図 7 は、コスト情報テーブル 3 5 0 のデータ構成の一例を示す図である。コスト情報テーブル 3 5 0 は、各車両の車両 ID 3 5 1、及び車両の単位コスト 3 5 2 (例えば、単位時間あたりの配送コスト、単位移動距離あたりの配送コスト) の各データを有する。

【 0 0 6 0 】

( 評価基準情報テーブル )

図 8 は、評価基準情報テーブル 3 6 0 のデータ構成の一例を示す図である。評価基準情報テーブル 3 6 0 は、各評価基準 3 6 1、各評価基準における評価値の算出方法 3 6 2 の各データを有する。

【 0 0 6 1 】

同図の例では、評価基準 3 6 1 は、荷物の積載量に関する評価基準、車両の稼働時間に関する評価基準、車両の移動距離に関する評価基準、及び、車両の配送コストに関する評価基準を有する。これらの評価基準に係る評価値の算出方法 3 6 2 は、本実施形態では、算出される評価値が大きいほど評価が良好となるような任意の式であるものとする。例えば、荷物の積載量が大きいほど評価値が高く、車両の稼働時間が短いほど評価値が高く、車両の移動の移動距離が短いほど評価値が高く、車両のコスト(時間に基づくコスト又は距離に基づくコスト)が低いほど評価値が高くなるような算出式がそれぞれ評価基準情報テーブル 3 6 0 に設定される。なお、車両のコストは、例えば、拠点情報テーブル 3 2 0、移動時間情報テーブル 3 4 0、及びコスト情報テーブル 3 5 0 に基づいて算出される。

【 0 0 6 2 】

なお、ここで説明した評価基準及び評価値の算出方法は一例であり、例えば、車両が全配送で処理した注文の数を評価基準(の算出方法)としてもよい。

【 0 0 6 3 】

次に、図 2 に示すように、輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、断熱量子計算を採用したイジングモデル 4 0 0 を記憶する。イジングモデル 4 0 0 の詳細は後述する。なお、イジングモデル 4 0 0 は、輸送計画作成支援装置 1 0 0 の管理者等が予め設定しておく。

【 0 0 6 4 】

なお、アニーリングマシンの概要にて述べた断熱量子計算は、別名で量子アニールとも呼ばれ、古典的な焼きなましの概念を量子力学に発展させたものである。即ち、断熱量子計算は本来古典的動作が可能で、高速性や解の正解率に関して性能を向上させるために量子力学的効果が付加されたものとも解釈できる。そこで、本実施形態では、輸送計画作成支援装置 1 0 0 の演算部 1 0 4 そのものは古典的とし、演算過程に量子力学的に定まるパラメータを導入することにより、古典的であるが量子力学的な効果を含んだ演算方法・装置を実現し、イジングモデル 4 0 0 による演算を行うものとする。ただし、演算部 1 0 4 を量子コンピュータで構成する形態についても勿論採用しうる。

【 0 0 6 5 】

以上を前提に、以下では、断熱量子計算との関連性を説明しながら、輸送計画作成支援装置 1 0 0 がイジングモデル 4 0 0 の解としての基底状態を得る古典的アルゴリズムと、それを実現するためのイジングモデル 4 0 0 の構成に関して述べる。

【 0 0 6 6 】

輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、N 個の変数  $s_j^z$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) が - 1

10

20

30

40

50

$s_j^z = 1$  の値域を取り、局所場  $g_j$  と変数間相互作用  $J_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, N$ ) を有するイジングモデルを設定する。

【0067】

具体的には、演算部 104 は、時刻を  $m$  分割して離散的に  $t = t_0, (t_0 = 0)$  から  $t_m (t_m = \tau)$  まで演算するものとし、各時刻  $t_k$  における変数  $S_j^z(t_k)$  を求めるに当たり、前時刻  $t_{k-1}$  の変数  $S_j^z(t_{k-1})$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) の値と緩和項の係数  $9pin_a$  あるいは  $9pin_b$  を用いて  $B_j^z(t_k) = \{ -J_{ij} S_i^z(t_{k-1}) + g_j + \text{sgn}(s_j^z(t_{k-1})) \cdot 9pin_a \} \cdot t_k / \tau$  あるいは  $B_j^z(t_k) = \{ -J_{ij} S_i^z(t_{k-1}) + g_j + 9pin_b \} \cdot S_j^z(t_{k-1}) \cdot t_k / \tau$  を求め、上述の変数  $S_j^z(t_k)$  の値域が  $-1 \leq S_j^z(t_k) \leq 1$  になるように関数  $f$  を定めて  $S_j^z(t_k) = f(B_j^z(t_k), t_k)$  とし、時刻ステップを  $t = t_0$  から  $t = t_m$  に進めるにつれて上述の変数  $S_j^z$  を  $-1$  あるいは  $1$  に近づけ、最終的に  $s_j^z < 0$  ならば、 $S_j^{z,d} = -1$ 、 $S_j^z > 0$  ならば、 $S_j^{z,d} = 1$  とし解を定める。

10

【0068】

係数  $9pin_b$  は、例えば  $|J_{ij}|$  の平均値の 50% から 200% の値である。また、課題設定の局所場  $g_j$  に関して、あるサイト  $j'$  に対してのみ補正項  $g_{j'}$  を  $g_j$  に加え、該サイト  $j'$  に対してのみ  $g_{j'}$  の大きさを大きくすることもできる。また、補正項  $g_{j'}$  は、例えば  $|J_{ij}|$  の平均値の 10% から 100% の値である。

【0069】

20

続いて、量子力学的な記述から出発して古典的な形式に移行することを通して、輸送計画作成支援装置 100 が実現するアニーリングマシンの基本的原理を述べる。

【0070】

式(3)で与えられるイジングスピン・ハミルトニアン基底状態探索問題は NP 困難と呼ばれる分類の問題を含み、有用な問題であることが知られている(文献: F. Barahona, "On the computational complexity of Ising spin glass models," J. Phys. A: Math. Gen. 15, 3241 (1982).)。

【0071】

[式3]

30

$$\hat{H}_p = -\sum_{i>j} J_{ij} \hat{\sigma}_i^z \hat{\sigma}_j^z - \sum_j g_j \hat{\sigma}_j^z$$

$J_{ij}$  及び  $g_j$  が課題設定パラメータであり、 $\hat{\sigma}^z$  はパウリのスピン行列の  $z$  成分で  $\pm 1$  の固有値を取る。 $i, j$  はスピンのサイトを表す。イジングスピンとは値として  $\pm 1$  だけを取りうる変数のことで、式(3)では  $\hat{\sigma}^z$  の固有値が  $\pm 1$  であることによりイジングスピン系となっている。

40

【0072】

式(3)のイジングスピンは文字通りのスピンである必要はなく、ハミルトニアンが式(3)で記述されるのであれば物理的には何でも良い。

【0073】

例えば、後述する各車両の各配送経路の利用有無を  $\pm 1$  に対応付けることや、ロジック回路の high と low を  $\pm 1$  に対応付けることも可能であるし、光の縦偏波と横偏波を  $\pm 1$  に対応付けることや  $0, \pi$  の位相を  $\pm 1$  に対応付けることも可能である。

【0074】

ここで例示する方法では、断熱量子計算と同様に、時刻  $t = 0$  において式(4)で与えられるハミルトニアンの基底状態に演算系を準備する。

50

【 0 0 7 5 】

[ 式 4 ]

$$\hat{H}_0 = -\gamma \sum_j \hat{\sigma}_j^x$$

は全サイト  $j$  に一様に掛かる外場の大きさで決まる比例定数であり、 $\hat{\sigma}_j^x$  は、パウリのスピン行列の  $x$  成分である。演算系がスピンそのものであれば、外場とは磁場を意味する。

10

【 0 0 7 6 】

式 ( 4 ) は、横磁場を印加したことに相当し、すべてのスピンの  $x$  方向を向いた場合 ( $t > 0$ ) が基底状態である。問題設定のハミルトニアンは  $z$  成分のみのイジングスピン系として定義されたが、式 ( 4 ) にはスピンの  $x$  成分が登場している。従って、演算過程でのスピンはイジングではなくベクトルの (プロッホベクトル) である。  $t = 0$  では式 ( 4 ) のハミルトニアンでスタートしたが、時刻  $t$  の進行と共に徐々にハミルトニアンを変化させ、最終的には式 ( 3 ) で記述されるハミルトニアンにしてその基底状態を解として得る。

20

【 0 0 7 7 】

[ 式 5 ]

$$\hat{H} = -\mathbf{B} \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}}$$

ここで  $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$  はパウリのスピン行列の 3 成分をベクトルとして表示している。基底状態はスピンが磁場方向を向いた場合で、 $\langle \hat{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \mathbf{B} \rangle = |\mathbf{B}|$  と書ける。断熱過程では常に基底状態を維持しようとするので、スピンの向きは常に磁場の向きに追従する。

30

【 0 0 7 8 】

以上の議論は多スピン系にも拡張できる。  $t = 0$  ではハミルトニアンが式 ( 4 ) で与えられる。これは全スピンに対して一様に磁場  $B_j^x = \gamma$  が印加されたことを意味する。  $t > 0$  では、磁場の  $x$  成分が徐々に弱まり  $B_j^x = \gamma (1 - t/\tau)$  である。  $z$  成分に関してはスピン間相互作用があるために有効磁場としては式 ( 6 ) になる。

【 0 0 7 9 】

[ 式 6 ]

$$\hat{B}_j^z(t) = \frac{t}{\tau} \left( \sum_{i \neq j} J_{ij} \hat{\sigma}_i^z + g_j \right)$$

40

スピンの向きは  $\langle \hat{\sigma}^z \rangle / \langle \hat{\sigma}^x \rangle$  で規定できるので、スピンの向きが有効磁場に追従するならば式 ( 7 ) によりスピンの向きが定まる。

【 0 0 8 0 】

[ 式 7 ]

50

$$\langle \hat{\sigma}_j^z \rangle / \langle \hat{\sigma}_j^x \rangle = \langle \hat{B}_j^z(t) \rangle / \langle \hat{B}_j^x(t) \rangle$$

式(7)は量子力学的記述であるが期待値を取っているので、式(1)~(6)とは異なり古典量に関する関係式である。

【0081】

古典系では量子力学の非局所相関(量子縫れ)がないので、スピンの向きはサイトごとの局所場により完全に決まるはずであり、式(7)が古典的スピン系の振る舞いを決定する。量子系では非局所相関があるために式(7)は変形されることになるが、それに関しては後述することとし、ここでは発明の基本形態を述べるために式(7)で定まる古典系について記述する。

10

【0082】

図9に、スピン系の基底状態を得るためのタイミングチャートを示す。同図の記述は古典量に関するものなので、サイトjのスピンを  $\hat{s}_j$  ではなく  $s_j$  により表した。またそれに伴い、同図の有効磁場  $B_j$  は古典量である。  $t = 0$  において全サイトで右向き有効磁場  $B_j$  が印加され、全スピン  $S_j$  が右向きに初期化される。

【0083】

20

時間  $t$  の経過に従い、徐々に  $z$  軸方向の磁場とスピン間相互作用が加えられ、最終的にスピンは  $+z$  方向あるいは  $-z$  方向となって、スピン  $S_j$  の  $z$  成分が  $s_j^z = +1$  あるいは  $-1$  となる。時間  $t$  は連続的であることが理想であるが、実際の演算過程では離散的にして利便性を向上させることもできる。以下では離散的な場合を述べる。

【0084】

ここで例示するスピンは  $z$  成分だけでなく  $x$  成分が加わっているためにベクトル的なスピンになっている。図9からもベクトルとしての振る舞いが理解できる。ここまで  $y$  成分が登場してこなかったが、それは外場方向を  $xz$  面に取ったために外場の  $y$  成分が存在せず、従って  $\langle \hat{Y} \rangle = 0$  となるためである。

【0085】

30

演算系のスピンとしては大きさ1の3次元ベクトル(これをブロッホベクトルと呼び、球面上の点で状態を記述できる)を想定しているが、図9に示す例における軸の取り方では2次元のみを考慮すればよい(円上の点で状態を記述できる)。

【0086】

また  $B_j^x(t) > 0$  ( $< 0$ ) あるいは  $B_j^x(t) < 0$  ( $> 0$ ) が成り立つ。この場合、2次元スピンベクトルは半円のみで記述できることになり、 $[-1, 1]$  で  $S_j^z$  を指定すれば  $S_j^z$  の1変数で2次元スピンベクトルが定まる。従って、ここでの例では、スピンは2次元ベクトルであるが、値域を  $[-1, 1]$  とする1次元連続変数として表記することもできる。

【0087】

40

図9のタイミングチャートでは時刻  $t = t_k$  においてサイトごとに有効磁場を求め、その値を用いて式(8)により  $t = t_k$  におけるスピンの向きを求める。

【0088】

[式8]

$$s_j^z(t_k) / s_j^x(t_k) = B_j^z(t_k) / B_j^x(t_k)$$

式(8)は式(7)を古典量に関する表記に書き改めたものなので  $\langle \cdot \rangle$  の記号が付い

50

ていない。次に、 $t = t_{k+1}$ の有効磁場を $t = t_k$ におけるスピンの値を用いて求める。各時刻の有効磁場を具体的に書けば式(9)及び(10)となる。

【0089】

[式9]

$$B_j^x(t_{k+1}) = \left(1 - \frac{t_{k+1}}{\tau}\right) \gamma$$

10

[式10]

$$B_j^z(t_{k+1}) = \frac{t_{k+1}}{\tau} \left( \sum_{i \neq j} J_{ij} s_i^z(t_k) + g_j \right)$$

20

以下、図9のタイミングチャートで模式的に示した手順に従い、スピンと有効磁場を交互に求めていく。

【0090】

古典系ではスピンベクトルの大きさは1である。この場合スピンベクトルの各成分は、 $\tan \theta = B_j^z(t_k) / B_j^x(t_k)$ で定義される媒介変数  $\theta$  を用いて  $S_j^z(t_k) = \sin \theta$ 、 $S_j^x(t_k) = \cos \theta$  と記述される。

【0091】

これを書き直せば、 $S_j^z(t_k) = \sin(\arctan(B_j^z(t_k) / B_j^x(t_k)))$ 、 $S_j^x(t_k) = \cos(\arctan(B_j^z(t_k) / B_j^x(t_k)))$  である。

30

【0092】

式(9)から明らかなように  $B_j^x(t_k)$  の変数は、 $t_k$ のみであり、 $\gamma$  は定数である。従って、 $S_j^z(t_k) = \sin(\arctan(B_j^z(t_k) / B_j^x(t_k)))$  及び  $S_j^x(t_k) = \cos(\arctan(B_j^z(t_k) / B_j^x(t_k)))$  は  $B_j^z(t_k)$  と  $t_k$  を変数とする関数として  $S_j^z(t_k) = f_1(B_j^z(t_k), t_k)$  及び  $S_j^x(t_k) = f_2(B_j^z(t_k), t_k)$  のような一般化した表現もできる。

【0093】

スピンを2次元ベクトルとして記述しているので、 $S_j^z(t_k)$  と  $S_j^x(t_k)$  の2成分が登場しているが、 $B_j^z(t_k)$  を式(10)に基づき決定するならば  $S_j^x(t_k)$  は必要ない。

40

【0094】

これは、 $[-1, 1]$  を値域とする  $S_j^z(t_k)$  のみでスピン状態を記述できることに対応している。最終的な解  $S_j^{z,d}$  は、 $S_j^{z,d} = -1$  or  $1$  になる必要があり、 $S_j^z(t_k) > 0$  ならば  $S_j^{z,d} = 1$ 、 $S_j^z(t_k) < 0$  ならば  $S_j^{z,d} = -1$  とする。

【0095】

図10に、上述のイジングモデルにおける解法アルゴリズムをフローチャートにまとめたものを示す。ここで  $t_m = t_{k+1}$  である。同図のフローチャートの各ステップ  $s_1 \sim s_9$  は、時間  $t = 0$  から  $t = t_m$  に到る図9のタイミングチャートの、ある時刻での処理に対応し

50

ている。すなわち、フローチャートのステップ s 2、s 4、s 6 がそれぞれ、 $t = t_1, t_{k+1}, t_m$ における上記の式 (9) 及び (10) に対応している。最終的な解はステップ s 8 において、 $s_j^z < 0$  ならば  $S_j^{z^d} = -1$ 、 $S_j^z > 0$  ならば、 $S_j^{z^d} = 1$  とすることにより定める (s 9)。

【0096】

ここまでは具体的課題たるイジングモデル 400 が式 (3) で表現された場合に如何に解かれるかを示した。次に具体的課題たるイジングモデル 400 が如何に局所場  $g_j$  と変数間相互作用  $J_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, N$ ) を含む式 (3) で表現されるかに関して具体例を挙げて説明する。

【0097】

ここでの具体的課題すなわちイジングモデル 400 は、例えば、各評価基準についての配送経路候補の評価値、及び、第 2 の制約条件が満たされる際に最小となる制約条件用関数、を項として含む目的関数に関して、各車両の各配送の経路の利用有無をスピンとし、制約条件用関数における変数間の感応度をスピンの間の相互作用の強度として設定する。

【0098】

この場合、局所場  $g_j$  は、上述の例えば、各評価基準についての配送経路候補の評価値、及び、第 2 の制約条件が満たされる際に最小となる制約条件用関数、における変数の値が目的関数へ与える影響度として設定されることを想定する。

【0099】

以上のような考察を通して、(上述の目的関数の各項の間に関する) 変数間相互作用  $J_{ij}$  と局所場  $g_j$  を具体的に設定し、式 (3) で表されるイジングモデル 400 の基底状態探索、すなわち上述の目的関数が最小となる基底状態の探索を通して、各車両の配送経路を特定する。

【0100】

なお、イジングモデルとアニーリング法で計算するのは、「目的関数を最小化する」ことだけである。そのため、目的関数を最小化の際に満たされる必要がある制約条件がある場合、それらを何らかの形で目的関数に足し込む必要がある。

【0101】

例えば、

[式 11]

$$\sum_i x_i = A$$

という制約条件を考えてみる。この制約条件を「制約条件が満たされる時に最小となる関数」に変換するとすれば、以下の式になる。

【0102】

[式 12]

$$\left[ \sum_i x_i - A \right]^2$$

二乗となっている部分は必ず正の値となるため、この式が最小値となるのは二乗の中身が 0 となる時だけである。中身が 0 となるのは  $x_i - A = 0$ 、の時だけであるので、この関数が最小となる最適化問題を解けば、 $x_i = A$  が満たされている解が自動的に得られることになる。

10

20

30

40

50

【 0 1 0 3 】

また、例えば、上述のアニーリング法では、制約条件としたい項目も目的関数に入れ込んでしまう必要があるため、目的関数も制約条件も同じ重要度で扱うことになる。

【 0 1 0 4 】

例えば、以下のような最適化問題があったとする。

【 0 1 0 5 】

[ 式 1 3 ]

$$\begin{aligned} \min & : \sum_k a_k x_k \\ \text{subject to} & : \sum_k b_k x_k = B \\ & : \sum_k c_k x_k = C \end{aligned}$$

10

これをアニーリング用の定式化に変更すると、以下のようになる。

【 0 1 0 6 】

[ 式 1 4 ]

$$\min : \sum_k a_k x_k + P \left[ \sum_k b_k x_k - B \right]^2 + Q \left[ \sum_k c_k x_k - C \right]^2$$

20

ここでPとQは定数であり、どの項を優先的に最小化するかを決めるファクタとなる。例えば、3つの項すべてを平等に最小化する（つまり、制約条件の強さに偏りをつけないで問題を解く）場合、PとQを同等にするなど、項間でバランスをとるよう値の設定を行う。

30

【 0 1 0 7 】

一方、「第3項の制約条件は第3項の制約条件ほど重視しない」という問題設定であれば、重視する項の係数であるPの値を、Qの値より大きくすることで望みの解が得られることになる。

【 0 1 0 8 】

このようにアニーリング法によれば、制約条件に優先度を付し、あまり重視しない制約条件については「なるべく満たす」といった設定が可能になる。

【 0 1 0 9 】

なお、イジングモデルに関する各種設定は、本実施形態の各条件、情報に応じ、既存の一般的概念に沿った形で適宜に行うものとする。

40

【 0 1 1 0 】

以上に説明した、輸送計画作成支援装置100が実現する各機能は、演算部104が、メモリ103又は記憶部101に格納されている各プログラムを読み出して実行することにより実現される。また各プログラムは、例えば、記録媒体に記録して配布することができる。なお、輸送計画作成支援装置100は、その全部または一部が、例えば、クラウドシステムによって提供される仮想サーバのように、仮想化技術やプロセス空間分離技術等を用いて提供される仮想的な情報処理資源を用いて実現されるものであってもよい。また、輸送計画作成支援装置100によって提供される機能の全部または一部は、例えば、クラウドシステムがAPI (Application Programming Interface)等を介して提供するサ

50

ービスによって実現してもよい。

次に、輸送計画作成支援システム 1 で行われる処理について説明する。

#### 【0111】

<輸送計画作成支援処理>

図 1 1 は、輸送計画作成支援システム 1 で行われる輸送計画作成支援処理の一例を説明するフロー図である。輸送計画作成支援処理は、例えば、輸送計画作成支援装置 1 0 0 がユーザの入力を介してユーザ端末 2 0 0 から所定の開始指示を受信したことを契機に実行される。

#### 【0112】

まず、輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、輸送業務に関する条件の情報を設定する ( s 1 0 )。例えば、輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、ユーザ端末 2 0 0 から、ユーザからの入力を介して、車両情報テーブル 3 1 0、拠点情報テーブル 3 2 0、注文情報テーブル 3 3 0、移動時間情報テーブル 3 4 0、コスト情報テーブル 3 5 0、及び評価基準情報テーブル 3 6 0 に対応する情報を受信し、受信した情報を対応する各テーブルに記憶する。

10

#### 【0113】

次に、輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、数理計画法を用いて、s 1 0 で記憶した情報に基づき、各評価基準の下で、各車両が遵守が必要とされている第 1 の制約条件を満たすような好適な配送経路の組み合わせ (以下、配送経路候補という) をそれぞれ算出する配送経路候補作成処理 s 2 0 を実行する。配送経路候補作成処理 s 2 0 の詳細は後述する。

#### 【0114】

そして、輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、配送経路候補作成処理 s 2 0 で作成した各配送経路候補に基づき、イジングモデル 4 0 0 を利用して、全体として最適な全車両の配送経路の組み合わせ (以下、最適配送経路という) を作成する最適配送経路作成処理 s 3 0 を実行する。最適配送経路作成処理 s 3 0 の詳細は後述する。

20

#### 【0115】

輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、最適配送経路作成処理 s 3 0 で作成した最適配送経路の情報を、輸送計画作成支援装置 1 0 0 またはユーザ端末 2 0 0 に表示する ( s 4 0 )。以上で輸送計画作成支援処理は終了する。

以下、上記の各処理の詳細を説明する。

#### 【0116】

<配送経路候補作成処理>

配送経路候補作成処理は、数理計画法による数理計画問題 (最適化問題) を解く従来の方法によって行うことができる。例えば、特許文献 1 に示される方法によって、配送経路を作成することができる。以下、特許文献 1 に基づいて、配送経路の作成方法を簡単に説明する。

30

#### 【0117】

図 1 2 は、評価基準が配送コストである場合の、第 1 の制約条件を満たしかつ配送コストを最適化する配送経路候補を決定する処理の一例を示すフロー図である。

#### 【0118】

同図に示すように、配送経路候補作成部 1 1 1 は、遺伝的アルゴリズムを用いて作成したある検討対象車両の配送経路について、第 1 の制約条件における荷物の重量若しくは容量又は車両の種類等を満たすか否かを判定する ( S 2 0 1 )。例えば、配送経路候補作成部 1 1 1 は、車両情報テーブル 3 1 0 の最大容量積載量 3 1 4 及び最大重量積載量 3 1 5、並びに、拠点情報テーブル 3 2 0 の進入可能車両 3 2 5 を参照する。

40

#### 【0119】

配送経路が上記第 1 の制約条件を満たす場合は ( S 2 0 1 : Y E S )、配送経路候補作成部 1 1 1 は、S 2 0 2 の処理を実行し、配送経路が上記第 1 の制約条件のいずれかを満たしていない場合は ( S 2 0 1 : N O )、配送経路候補作成部 1 1 1 は、処理を終了する (例えば、検討対象車両の他の配送経路を検討する)。

#### 【0120】

50

S 2 0 2において配送経路候補作成部 1 1 1は、最善の配送経路を探索する。具体的には、配送経路候補作成部 1 1 1は、配送経路上の配送先の各挿入箇所の異なる配送経路候補毎の配送コストの評価値を、評価基準情報テーブル 3 6 0に基づき計算する。そして、配送経路候補作成部 1 1 1は、配送コストの評価値（時間に基づくコスト及び距離に基づくコスト）が最大となる位置に、新たに割り当てる配送先（注文）を挿入することで、新たな配送経路を作成する。そして、配送経路候補作成部 1 1 1は、その最善の経路を、仮の配送経路候補として選択する。

【 0 1 2 1 】

配送経路候補作成部 1 1 1は、選択した仮の配送経路候補（が示す配送時間スケジュール）が、第 1 の制約条件における時間上の制約を満たしているか否かを判定する（S 2 0 3）。例えば、配送経路候補作成部 1 1 1は、車両情報テーブル 3 1 0の最長稼働時間 3 1 2、注文情報テーブル 3 3 0の集荷可能時間帯 3 3 5及び荷卸し可能時間帯 3 3 6、並びに、拠点情報テーブル 3 2 0の稼働時間帯 3 2 2を参照する。

10

【 0 1 2 2 】

仮の配送経路候補が時間上の制約を満たしている場合は（S 2 0 3 : Y E S）、配送経路候補作成部 1 1 1は、S 2 0 4の処理を実行し、仮の配送経路候補が時間上の制約を満たしていない場合は（S 2 0 3 : N O）、配送経路候補作成部 1 1 1は、処理を終了する（例えば、検討対象車両の他の配送経路を検討する）。

【 0 1 2 3 】

S 2 0 4において配送経路候補作成部 1 1 1は、仮の配送経路候補が、距離上の制約を満たしているか否かを判定する。例えば、配送経路候補作成部 1 1 1は、車両情報テーブル 3 1 0の最長稼働距離 3 1 3を参照する。

20

【 0 1 2 4 】

仮の配送経路候補が距離上の制約を満たしている場合は（S 2 0 4 : Y E S）、配送経路候補作成部 1 1 1は、仮の配送経路候補を正式な配送経路候補として記憶し（S 2 0 5）、処理を終了する。仮の配送経路候補が距離上の制約を満たしていない場合は（S 2 0 4 : N O）、配送経路候補作成部 1 1 1は、処理を終了する（例えば、検討対象車両の他の配送経路を検討する）。

【 0 1 2 5 】

配送経路候補作成部 1 1 1は、以上のような処理を、各検討対象車両について、評価基準情報テーブル 3 6 0の複数の各評価基準について行う。

30

【 0 1 2 6 】

（配送経路候補）

図 1 3は、配送経路候補作成処理 s 2 0により作成される配送経路候補の例を示す図である。この配送経路候補は、各評価基準について評価値が最適化されており、車両の積載量に係る評価基準（「積載量」）の評価値が高い各車両の配送経路候補 1 3 0 1、車両の稼働時間に係る評価基準（「稼働時間」）の評価値が高い各車両の配送経路候補 1 3 0 2、及び、車両の移動距離に係る評価基準（「移動距離」）の評価値が高い各車両の配送経路候補 1 3 0 3等からなる。

【 0 1 2 7 】

例えば、車両の積載量に係る評価基準の評価値が高い配送経路候補は、「車両 1」が「経路 1 - 1」により荷物を輸送する経路と、「車両 2」が「経路 2 - 1」により荷物を配送する経路と、「車両 3」が「経路 3 - 1」により荷物を配送する経路と、「車両 n」が「経路 n - 1」により荷物を配送する経路とを含む。

40

【 0 1 2 8 】

また、車両の稼働時間に係る評価基準の評価値が高い配送経路候補は、「車両 1」が「経路 1 - 2」により荷物を輸送する経路と、「車両 2」が「経路 2 - 2」により荷物を配送する経路と、「車両 n」が「経路 n - 2」により荷物を配送する経路とを含む。

【 0 1 2 9 】

また、車両の移動距離に係る評価基準の評価値が高い配送経路候補は、「車両 1」が「

50

経路 1 - 3」により荷物を輸送する経路と、「車両 2」が「経路 2 - 3」により荷物を配送する経路とを含む。

【 0 1 3 0 】

なお、以上に説明した配送経路候補作成処理 s 2 0 は一例である。配送経路候補作成処理 s 2 0 は、ここで説明した手法に限らず、線形計画法等の数理計画法において、第 1 の制約条件の項を有する目的関数を利用した最適化問題を解く（例えば、目的関数の値が最小値又は最小値をとる場合の各変数の値を決定する）ことにより、各評価基準に基づき、各車両の配送経路及び配送時間スケジュールを順次算出するものであればよい。

【 0 1 3 1 】

ただし、このように数理計画法は、配送経路を各車両について順次作成するものであるため、車両によってその評価値に偏りが生じる場合がある（例えば、処理の後段で算出される車両の評価値が低くなる傾向が生じる）。しかし、この問題点は、後述するように、最適配送経路作成処理 s 3 0 により改善することができる。

次に、最適配送経路作成処理 s 3 0 について説明する。

【 0 1 3 2 】

<最適配送経路作成処理>

図 1 4 は、最適配送経路作成処理 s 3 0 の詳細を説明するフロー図である。最適配送経路作成部 1 1 2 は、まず、イジングモデル 4 0 0 に用いる第 2 の制約条件、重み値、評価基準の目標値を取得する（s 3 0 1）。

【 0 1 3 3 】

例えば、最適配送経路作成部 1 1 2 は、配送に使用する全車両数 P を、ユーザ入力を通じてユーザ端末 2 0 0 から受信する。なお、後述するように、P = 0 の場合は、制約条件ではなく、全車両数を最小化するためのパラメータとなる。

【 0 1 3 4 】

また、最適配送経路作成部 1 1 2 は、後述する各重み値（車両数重み値 A、評価値重み値 B、経路数重み値 C、評価値偏差重み値 D）を、ユーザ入力を介してユーザ端末 2 0 0 から受信する。

【 0 1 3 5 】

また、最適配送経路作成部 1 1 2 は、第 2 の制約条件として、評価指標 k に係る評価値の目標値  $A_k$  を、ユーザ入力を介してユーザ端末 2 0 0 から受信する。

【 0 1 3 6 】

さらに、最適配送経路作成部 1 1 2 は、イジングモデル 4 0 0 に用いる車両の経路及び評価値を取得する（s 3 0 3）。

【 0 1 3 7 】

例えば、最適配送経路作成部 1 1 2 は、配送経路候補作成処理 s 2 0 で算出した、各車両の各経路の組み合わせ（配送経路候補）と、その配送経路候補における配送時間スケジュールと、その配送経路候補に係る各評価基準の評価値とを取得する。

【 0 1 3 8 】

ここで、図 1 5 は、最適配送経路作成部 1 1 2 が取得するデータの一例を示す図である。同図に示すように、最適配送経路作成部 1 1 2 は、各車両の各経路の組み合わせ 1 5 0 1 と、その車両の経路の組み合わせに対応する、稼働時間に係る評価値 1 5 0 2、移動距離に係る評価値 1 5 0 3、及び、担当する注文の数に係る評価値 1 5 0 4 とを取得する。なお、各車両の各経路の組み合わせ 1 5 0 1 は、イジングモデル 4 0 0 においては後述するように、これを採用するか否かを示すバイナリ値 1 5 0 5 として管理される。

【 0 1 3 9 】

次に、図 1 4 の s 3 0 3 に示すように、最適配送経路作成部 1 1 2 は、s 3 0 1 及び s 3 0 3 で取得した第 2 の制約条件、重み値、目標値、車両の経路、及び評価値に基づき、イジングモデル 4 0 0 として下記の式（1 5）を作成する。

【 0 1 4 0 】

[ 式 1 5 ]

10

20

30

40

50

$$H = A \left[ \sum_i x_i - P \right]^2 - B \sum_k \sum_i W_{ik} x_i + C \sum_j \left[ \sum_{i \in R_j^{point}} x_i - 1 \right]^2 + \sum_k D_k \left[ \sum_i W_{ik} x_i - A_k \right]^2$$

## 【0141】

ここで、 $x_i$ は、経路*i*の利用有無（具体的には、利用する（1）又は利用しない（0）ことを示すバイナリ値の項）を示す、スピに対応する。 $w_{ik}$ は、経路*i*に係る評価指標*k*に係る評価値、 $R_j^{point}$ は、配送先*j*を通る経路の集合、*A*は配送に使用する全車両数を目標値*P*に近づけることを重視する程度を示す重み値（車両数重み値*A*）、*B*は評価値を最適化することを重視する程度を示す重み値（評価値重み値*B*）、*C*は各拠点に車両が一台のみ経由することを重視する程度を示す重み値（経路数重み値*C*）、*D<sub>k</sub>*は、経路（車両）の、評価指標*k*に係る評価値の目標値*A<sub>k</sub>*からの乖離を小さくすることを重視する程度を示す重み値（評価値偏差重み値*D*）である。

10

## 【0142】

式（15）の右辺の第1項は、配送に使用する車両数の目標値*P*からの乖離を示す項である。ハミルトニアン*H*が基底状態となる場合に、この項の値は最小化される（すなわち、配送に使用する車両数は目標値*P*に近づく）。なお、*P* = 0の場合、上記式は、全車両数を最小化する式となる。すなわち、この項は、*P*が0でない場合は最適化の対象となる項となり、*P* = の場合は第2の制約条件の項（制約条件用関数の項）となる。

20

## 【0143】

式（15）の右辺の第2項は、各評価基準による各経路の評価値の合計を示す項である。ハミルトニアン*H*が基底状態となる場合に、この項の値は最大化される。

## 【0144】

式（15）の右辺の第3項は、各拠点において、経由する（各拠点で集荷を行う）車両の台数 - 1の値を示す、第2の制約条件の項（制約条件用関数の項）である。ハミルトニアン*H*が基底状態となる場合に、この項の値は最小化される（すなわち、各拠点で車両が一台のみ集荷するように近づく）。

## 【0145】

式（15）の右辺の第4項は、経路（車両）の評価基準*k*に係る評価値の、目標値*A<sub>k</sub>*からの乖離の程度を示す、第2の制約条件の項（制約条件用関数の項）である。ハミルトニアン*H*が基底状態となる場合に、この項の値は最小化される（すなわち、各評価値は目標値*E*に近づく）。

30

## 【0146】

配送経路候補作成処理s20は、車両1台ずつ順次に経路を作成しているため、例えば、経路Aは5時間、経路Bは1時間などといったように、経路間に評価値（ここでは稼働時間）に偏りが生じる。そこで、イジングモデル400に、上記右辺の第4項を組み込むことにより、そのような経路間の偏りを解消することができる。

## 【0147】

なお、ある評価基準1に関する目標値*A<sub>1</sub>*が0とされた場合は、イジングモデル400は、各車両間の評価基準1に係る評価値の偏りを考慮しない。これにより、例えば、作業時間は偏りがないようにするが、注文の処理件数は偏りがあってもよい、とすることができる。

40

## 【0148】

このように、イジングモデル400は、第2の制約条件を罰則として計算する。そのため、イジングモデル400における解は、第2の制約条件を満たす方向の解であるが、必ずしも第2の制約条件を満たしているとは限らない。すなわち、イジングモデル400における第2の制約条件は、配送経路候補作成処理s20における第1の制約条件のような厳格な条件ではなく、遵守のレベルがより厳格ではない（逸脱が許容されうる）緩い制約条件となる。

50

## 【 0 1 4 9 】

( 最適配送経路 )

図 1 6 は、最適配送経路作成処理 s 3 0 により作成される最適配送経路の一例を示す図である。この最適配送経路は、全車両の全評価基準の評価値が全体として最適となる場合の各車両の経路を、図 1 3 で示した 4 つの評価基準に係る配送経路候補からそれぞれ特定した結果となっている ( 最適配送経路 ) 。

## 【 0 1 5 0 】

例えば、「車両 1」は稼働時間に係る評価値が高い「経路 1 - 2」の経路 1 6 0 1 を利用し、「車両 3」は積載量に係る評価値が高い「経路 3 - 1」の経路 1 6 0 3 を利用し、「車両 n」は稼働時間に係る評価値が高い「経路 n - 2」の経路 1 6 0 4 を利用するものと特定される。

10

## 【 0 1 5 1 】

なお、結果出力部 1 1 3 は、s 4 0 において、図 1 4、1 6 で説明した内容を示す画面を、輸送計画作成支援装置 1 0 0 又はユーザ端末 2 0 0 の画面に表示する。また、結果出力部 1 1 3 は、最適配送経路に対応づけられる、配送経路候補作成処理 s 2 0 で作成した配送スケジュールを表示してもよい。

## 【 0 1 5 2 】

以上に説明したように、本実施形態の輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、配送における制約条件であって逸脱が許容されない第 1 の制約条件を満たしつつ、所定の評価基準に基づく評価値が最適化されるような、各車両の配送の経路の組み合わせ ( 配送経路候補 ) を、複数の評価基準のそれぞれについて作成し ( 数理計画法による配送経路候補作成処理 s 2 0 )、各評価基準についての配送経路候補の評価値、及び、評価値に関する制約条件であって逸脱が許容される第 2 の制約条件が満たされる際に最小となる制約条件用関数、を項として含む目的関数に関して、各車両の各配送の経路の利用有無をスピンとし、制約条件用関数における変数間の感応度をスピンの間の相互作用の強度として設定したイジングモデル 4 0 0 を演算し ( 最適配送経路候補作成処理 s 3 0 )、その演算の結果に基づき、各車両の各経路の採用有無の情報を出力装置に出力する。

20

## 【 0 1 5 3 】

すなわち、本実施形態の輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、輸送計画において厳格に遵守すべき第 1 の制約条件を遵守した、各配送の最適な配送経路候補を複数の評価基準について作成しておき、その後、第 2 の制約条件を罰則とみなして計算を行うイジングモデル 4 0 0 により、第 2 の制約条件を好適に満たしつつも各評価基準の評価値を全体として最適化するような配送経路を特定することで、最適な配送経路を作成する。さらにこの場合、輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、複数の評価値に基づく配送経路の決定を、数理計画法等による最適化ではなくイジングモデル 4 0 0 により行うことで、各評価値を必要以上に厳格な制約とすることなく、全体として複数の評価基準に基づく評価値が高い、バランスが取れた配送経路を作成できる。

30

## 【 0 1 5 4 】

このように、本実施形態の輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、厳格に遵守すべき制約条件、及び、遵守が望ましいが必ずしも厳格な遵守を要求しない制約条件の双方を考慮した輸送計画の情報を、イジングモデル 4 0 0 を利用しつつ作成することができる。すなわち、本実施形態の輸送計画作成支援装置 1 0 0 によれば、多くの制約を有する輸送計画を、それら制約をその内容に応じて遵守しつつ迅速に作成することを支援することができる。

40

## 【 0 1 5 5 】

例えば、輸送計画の策定には、車両の積載制限、荷物の時間指定、又は、各拠点を利用可能な車両の種類といった様々な厳格な制約が存在するが、そのような場合であっても、適切な輸送計画の情報を迅速に作成することができる。

## 【 0 1 5 6 】

また、本実施形態の輸送計画作成支援装置 1 0 0 は、車両の種類、荷物の量の制限、又は配送にかかる時間若しくは距離に関する第 1 の制約条件を満たしつつ、評価基準に基づ

50

く評価値が最適化されるような配送経路候補を作成し、各評価基準についての配送経路候補の評価値、及び、評価値の所定目標値からの乖離が最小となる際に最小となる制約条件用関数、を項として含む目的関数に関するイジングモデル400を演算する。

【0157】

このように、輸送計画作成支援装置100が、車両の種類、荷物の量の制限、又は配送時間若しくは配送距離を厳格に遵守すべき第1の制約条件とし、評価値が所定目標値となるべきことを、必ずしも厳格な遵守を要求しない第2の制約条件とすることで、輸送業務の適正化を図ることができる。

【0158】

また、本実施形態の輸送計画作成支援装置100は、配送経路候補における車両数の目標値Pからの乖離が最小となる際に最小となる制約条件用関数を項として含むイジングモデル400を演算する。

10

【0159】

このように、輸送計画作成支援装置100が、車両の種類、配送に使用する車両数が目標値Pとなるべきことを、必ずしも厳格な遵守を要求しない第2の制約条件とすることで、輸送業務の柔軟かつ合理的な運営を図ることができる。

【0160】

また、本実施形態の輸送計画作成支援装置100は、配送経路候補における車両の数を項として含むイジングモデル400を演算する。

【0161】

これにより、輸送計画作成支援装置100は、イジングモデル400により、配送経路候補における車両の数を適正化(具体的には、最小化)できるので、輸送業務の効率的な運営を図ることができる。

20

【0162】

また、本実施形態の輸送計画作成支援装置100は、各評価基準についての、評価基準kに応じて設定された重み値 $A_k$ が付与された配送経路候補の評価値を項として含むイジングモデル400を演算する。

【0163】

このように、重み値を用いることで、イジングモデル400において各評価基準に関するチューニングを行うことができ、輸送業務のポリシーを詳細に設定することができる。特に、イジングモデル400は、評価基準が多数存在する場合であっても、このような重み値を用いたチューニングを、例えば数理計画法を用いた場合に比べて極めて高速に行うことができるので、輸送業務の詳細なポリシーを迅速に設定することができる。

30

【0164】

本発明は、上記実施形態に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲内で、任意の構成要素を用いて実施可能である。以上説明した実施形態や変形例はあくまで一例であり、発明の特徴が損なわれない限り、本発明はこれらの内容に限定されるものではない。また、上記では種々の実施形態や変形例を説明したが、本発明はこれらの内容に限定されるものではない。本発明の技術的思想の範囲内で考えられるその他の態様も本発明の範囲内に含まれる。

40

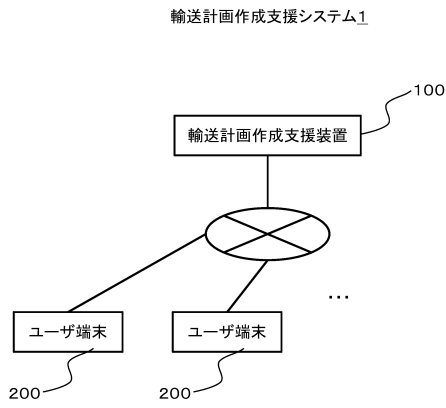
【符号の説明】

【0165】

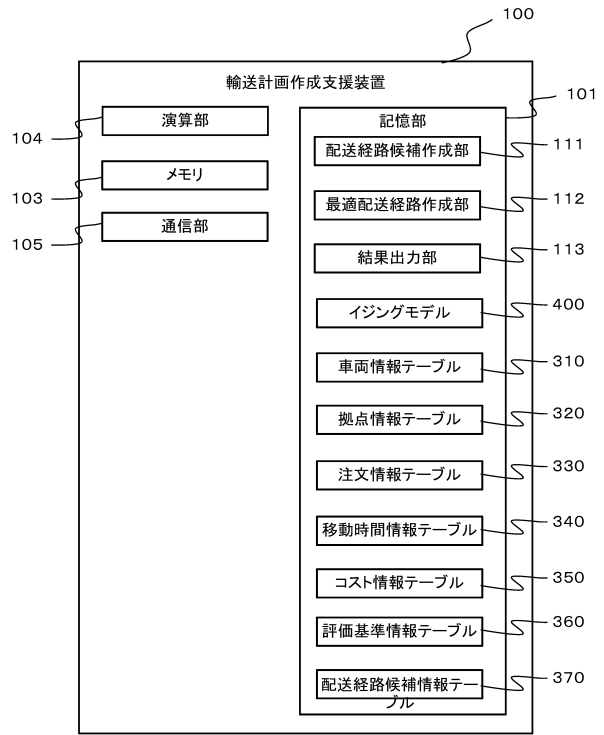
100 輸送計画作成支援装置、111 配送経路候補作成部、112 最適配送経路作成部、113 結果出力部

【図面】

【図 1】



【図 2】



10

20

【図 3】

車両情報310

311	312	313	314	315
車両ID	最長稼働時間	最長稼働距離	最大積載量(容量)	最大積載量(重量)

【図 4】

拠点情報320

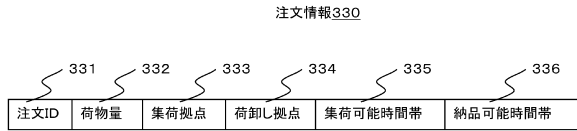
321	322	324	325
拠点ID	稼働時間帯	位置	進入可能車両

30

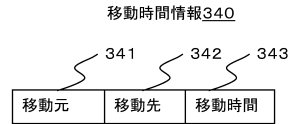
40

50

【図 5】



【図 6】



【図 7】



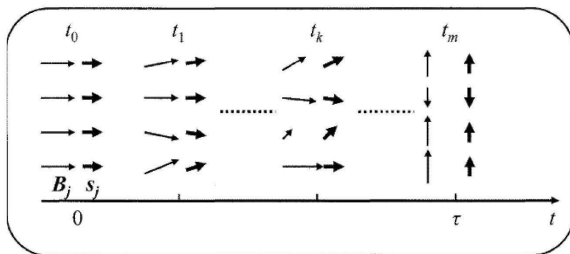
【図 8】

評価基準情報360

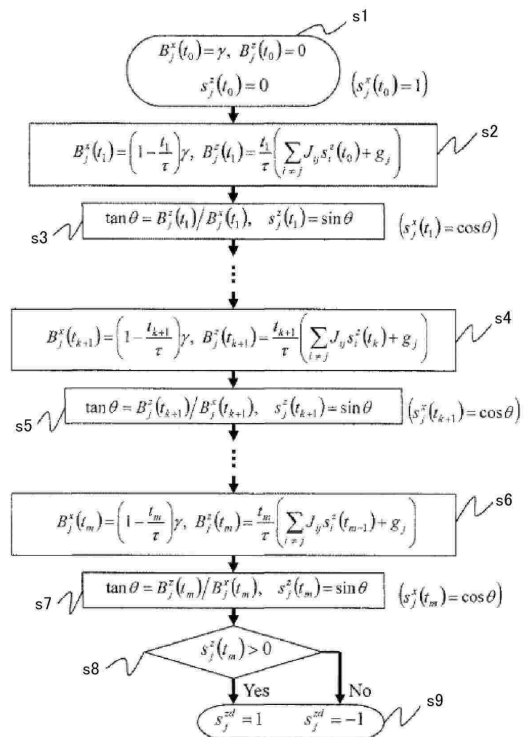
評価基準	評価値の算出方法
積載量	車両の配送量(容量、重量)の合計値
稼働時間	車両の稼働時間の逆数
移動距離	車両の移動距離の逆数
コスト	車両の配送に係るコストの逆数
⋮	⋮

10

【図 9】



【図 10】



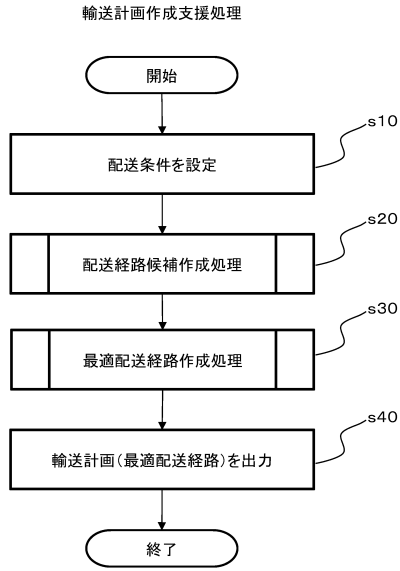
20

30

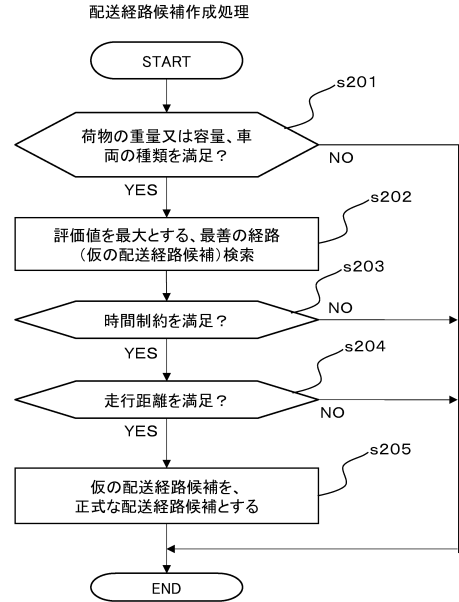
40

50

【図 1 1】



【図 1 2】



10

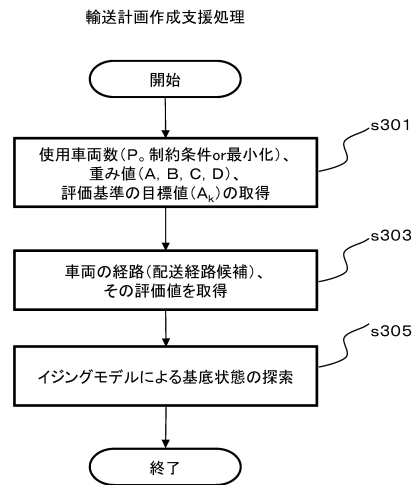
20

【図 1 3】

パラメータ 車両	積載量	稼働時間	移動距離	評価指標 i
車両1	経路1-1	経路1-2	経路1-3	経路1-m
車両2	経路2-1	経路2-2		経路2-m
車両3	経路3-1			経路3-m
車両n	経路n-1	経路n-2		経路n-m

1301, 1302, 1303

【図 1 4】



30

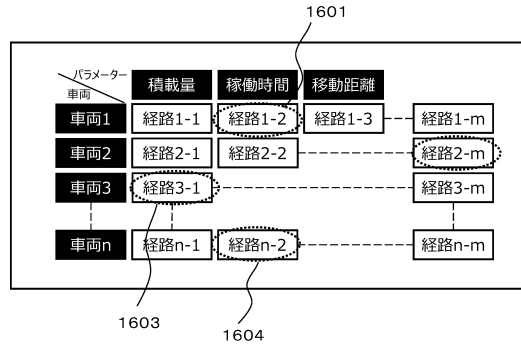
40

50

【図 15】

	1505	1501	1501	1501	...	1501	1501
		車両1 経路1	車両1 経路2	車両1 経路3	...	車両N 経路9,999	車両N 経路10,000
0/1変数 (バイナリ値)		$q_1$	$q_2$	$q_3$	...	$q_9$	$q_{10000}$
卸地1				✓	...	✓	
卸地2		✓		✓	...	✓	
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
卸地100					...		✓
稼働時間		3100	4100	5900	...	0	26500
1502 距離		45	25	150	...	84	67
1503 注文処理 件数		60	30	78	...	118	45
1504							

【図 16】



10

20

30

40

50

---

フロントページの続き

東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内

審査官 渡邊 加寿磨

- (56)参考文献 国際公開第2022/153716(WO, A1)  
特開平8-153085(JP, A)  
特開2021-111276(JP, A)  
特開2021-144511(JP, A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)  
G06Q 10/00-99/00