

(19)日本国特許庁(JP)

## (12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7521616号  
(P7521616)

(45)発行日 令和6年7月24日(2024.7.24)

(24)登録日 令和6年7月16日(2024.7.16)

(51)国際特許分類 F I  
H 0 4 L 41/40 (2022.01) H 0 4 L 41/40

請求項の数 10 (全17頁)

(21)出願番号	特願2022-579165(P2022-579165)	(73)特許権者	000004226 日本電信電話株式会社 東京都千代田区大手町一丁目5番1号
(86)(22)出願日	令和3年2月2日(2021.2.2)	(74)代理人	100107766 弁理士 伊東 忠重
(86)国際出願番号	PCT/JP2021/003659	(74)代理人	100070150 弁理士 伊東 忠彦
(87)国際公開番号	WO2022/168140	(74)代理人	100124844 弁理士 石原 隆治
(87)国際公開日	令和4年8月11日(2022.8.11)	(72)発明者	浦田 賢吾 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
審査請求日	令和5年6月26日(2023.6.26)	(72)発明者	原田 薫明 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 装置、方法、制御装置、制御方法及びプログラム

## (57)【特許請求の範囲】

## 【請求項1】

仮想ネットワークを物理ネットワーク上に割り当てる装置であって、サービスのトラフィック量の予測値と各物理ノードの電力量の予測値と前記物理ネットワークに関する情報とに基づいて、前記トラフィック量の予測値の不確実性と前記電力量の予測値の不確実性との下での最適化問題を解くことにより、前記仮想ネットワークを構成する仮想ノードの物理ノードへの割当又は前記仮想ノード間の経路決定を行う装置。

## 【請求項2】

前記仮想ノードの物理ノードへの割当又は前記仮想ノード間の経路決定は、仮想ネットワーク全体の総消費電力コスト又は総処理時間コストを最小化するように決定される、請求項1に記載の装置。

10

## 【請求項3】

仮想ネットワークを物理ネットワーク上に割り当てる装置であって、サービスのトラフィック量の予測値と各物理ノードの電力量の予測値と前記物理ネットワークに関する情報とに基づいて、トラフィック量の予測値と電力量の予測値の両者に関する予測誤差に対してロバストな最適化問題を解くことにより、前記仮想ネットワークを構成する仮想ノードの物理ノードへの割当又は前記仮想ノード間の経路決定を行う装置。

## 【請求項4】

仮想ネットワークを物理ネットワーク上に割り当てる方法であって、サービスのトラフィック量の予測値と各物理ノードの電力量の予測値と前記物理ネットワ

20

ークに関する情報とに基づいて、前記トラフィック量の予測値の不確実性と前記電力量の予測値の不確実性との下での最適化問題を解くことにより、前記仮想ネットワークを構成する仮想ノードの物理ノードへの割当又は前記仮想ノード間の経路決定をコンピュータが実行する方法。

【請求項 5】

仮想ネットワークを物理ネットワーク上に割り当てる方法であって、

サービスのトラフィック量の予測値と各物理ノードの電力量の予測値と前記物理ネットワークに関する情報とに基づいて、トラフィック量の予測値と電力量の予測値の両者に関する予測誤差に対してロバストな最適化問題を解くことにより、前記仮想ネットワークを構成する仮想ノードの物理ノードへの割当又は前記仮想ノード間の経路決定をコンピュータが

10

【請求項 6】

サービス提供を実現する仮想ネットワークを物理ネットワーク上に埋め込む制御装置であって、

前記サービスのトラフィック量の予測値と、前記物理ネットワークを構成する各物理ノードが使用可能な再生可能エネルギーを含む電力量の予測値とを取得する第 1 の取得部と、前記物理ネットワークに関する情報を取得する第 2 の取得部と、

前記トラフィック量の予測値と前記電力量の予測値と前記物理ネットワークに関する情報とに基づいて、前記仮想ネットワークを構成する仮想ノードの物理ノードへの割当と前記仮想ノード間の経路決定とに関する 2 - s t a g e ロバスト最適化問題の最適解を算出する解算出部と、

20

前記最適解が表す仮想ノードの割当と経路決定とに基づいて、前記物理ネットワークに埋め込まれた仮想ネットワークを制御する制御部と、

を有する制御装置。

【請求項 7】

前記トラフィック量の予測値は、前記トラフィック量のノミナル値と該ノミナル値からの偏差とで表され、

前記電力量の予測値は、前記電力量のノミナル値と該ノミナル値からの偏差とで表される、請求項 6 に記載の制御装置。

【請求項 8】

前記解算出部は、

Column-and-constraint generation法に基づいて、前記 2 - s t a g e ロバスト最適化問題をマスタープロブレムとサブプロブレムとに分解した上で、第 1 段階目で前記マスタープロブレムと前記サブプロブレムとを交互に解くことで、前記仮想ノードの割当に関する最適解を算出し、第 2 段階目で前記サブプロブレムを解くことで、前記経路決定に関する最適解を算出する、請求項 6 又は 7 に記載の制御装置。

30

【請求項 9】

サービス提供を実現する仮想ネットワークを物理ネットワーク上に埋め込む制御装置が、前記サービスのトラフィック量の予測値と、前記物理ネットワークを構成する各物理ノードが使用可能な再生可能エネルギーを含む電力量の予測値とを取得する第 1 の取得手順と、前記物理ネットワークに関する情報を取得する第 2 の取得手順と、

40

前記トラフィック量の予測値と前記電力量の予測値と前記物理ネットワークに関する情報とに基づいて、前記仮想ネットワークを構成する仮想ノードの物理ノードへの割当と前記仮想ノード間の経路決定とに関する 2 - s t a g e ロバスト最適化問題の最適解を算出する解算出手順と、

前記最適解が表す仮想ノードの割当と経路決定とに基づいて、前記物理ネットワークに埋め込まれた仮想ネットワークを制御する制御手順と、

を実行する制御方法。

【請求項 10】

コンピュータを、請求項 1 乃至 3 の何れか一項に記載の装置、又は、請求項 6 乃至 8 の

50

何れか一項に記載の制御装置として機能させるプログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、装置、方法、制御装置、制御方法及びプログラムに関する。

【背景技術】

【0002】

近年、仮想化技術であるNFV (Network Function Visualization) の発展に伴い、多種多様な仮想ネットワーク資源 (VR: Virtual Resource) や仮想ネットワーク機能 (VNF: Virtual Network Function) を柔軟に組み合わせることで、膨大な種類のネットワークサービスの提供が可能となっている。このようなサービスの提供を実現するためには、サービス毎にVRやVNFを物理リソースに適切に割り当てる必要がある。また、それに加えて、End-to-Endの経路も適切に決定する必要がある。このため、NFV環境下でVNF割当と経路決定を行う手法が従来から提案されている。

10

【0003】

例えば、非特許文献1では、通信ネットワーク全体の通信遅延等の通信性能を満足するだけでなく、通信ネットワーク全体の消費電力量を最小化するようなVNF割当や経路決定を行う手法が提案されている。また、例えば、非特許文献2では、サービスに関するトラフィック量に不確かさが存在するという仮定の下で、通信ネットワーク全体の消費電力量を考慮して、トラフィック量の不確かさに対してロバストなVNF割当と経路決定を行う手法が提案されている。

20

【0004】

ところで、近年では、環境負荷を低減するために、再生可能エネルギーを導入する動きが世界的に進められている。このことは、仮想ネットワーク環境の運用においても例外ではなく、通信ネットワークに供給される電力量も再生可能エネルギーの割合が多くなっていくことが予想される。一方で、再生可能エネルギーの供給電力量は自然環境等に左右されるため、通信ネットワークが使用可能な電力量は予測誤差を含んだ予測値として取得されると想定される。すなわち、再生可能エネルギーの電力量は不確かさが存在する情報として取得されると想定される。

【先行技術文献】

30

【非特許文献】

【0005】

【文献】M.M. Tajiki, S Salsano, L. Chiaraviglio, M. Shojafar, and B. Akbari, Joint energy efficient and QoS-aware path allocation and VNF placement for service function chaining, IEEE Transactions on Network and service management, 2019

【文献】D. Johansson, A. Kasser, and J. Taheri, On the energy cost of robustness and resiliency for virtual network function placement, 2018 IEEE Conference on Network Function Visualization and Software Defined Networks, 2018

【発明の概要】

40

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかしながら、上記の非特許文献1ではサービスに関するトラフィック量に不確かさが存在することを考慮していないため、例えば、通信性能の劣化や輻輳の発生等の問題が発生し得る。また、上記の非特許文献1及び2では通信ネットワークが再生可能エネルギーで運用されることを考慮していないため、例えば、不足電力の購入によるコスト増加や再生可能エネルギーの利用率低下による環境負荷の増大等の問題が発生し得ると考えられる。

【0007】

したがって、トラフィック量と再生可能エネルギーの両者の不確かさを考慮したVNF割当と経路決定を行う必要があると考えられる。

50

## 【 0 0 0 8 】

本発明の一実施形態は、上記の点に鑑みてなされたもので、トラフィック量の不確かさと再生可能エネルギーの不確かとに対してロバストな仮想ネットワーク制御を実現することを目的とする。

## 【課題を解決するための手段】

## 【 0 0 0 9 】

上記目的を達成するため、一実施形態に係る制御装置は、サービス提供を実現する仮想ネットワークを物理ネットワーク上に埋め込む制御装置であって、前記サービスのトラフィック量の予測値と、前記物理ネットワークを構成する各物理ノードが使用可能な再生可能エネルギーを含む電力量の予測値とを取得する第1の取得部と、前記物理ネットワークに関する情報を取得する第2の取得部と、前記トラフィック量の予測値と前記電力量の予測値と前記物理ネットワークに関する情報とに基づいて、前記仮想ネットワークを構成する仮想ノードの物理ノードへの割当と前記仮想ノード間の経路決定とに関する2-stageロバスト最適化問題の最適解を算出する解算出部と、前記最適解が表す仮想ノードの割当と経路決定とに基づいて、前記物理ネットワークに埋め込まれた仮想ネットワークを制御する制御部と、を有する。

10

## 【発明の効果】

## 【 0 0 1 0 】

トラフィック量の不確かさと再生可能エネルギーの不確かとに対してロバストな仮想ネットワーク制御を実現することができる。

20

## 【図面の簡単な説明】

## 【 0 0 1 1 】

【図1】サービスの物理ネットワークへの埋め込みの一例を説明するための図である。

【図2】本実施形態に係る制御装置のハードウェア構成の一例を示す図である。

【図3】本実施形態に係る制御装置の機能構成の一例を示す図である。

【図4】本実施形態に係る仮想ネットワーク制御処理の流れの一例を示すフローチャートである。

【図5】本実施形態に係る制御解の算出処理の流れの一例を示すフローチャートである。

## 【発明を実施するための形態】

## 【 0 0 1 2 】

30

以下、本発明の一実施形態について説明する。本実施形態では、トラフィック量の不確かさと再生可能エネルギーの不確かとに対してロバストな仮想ネットワーク制御（VNF割当と経路決定）を実現することが可能な制御装置10について説明する。なお、以下では、仮想ネットワークと区別するため、電力を必要とする物理サーバと物理リンクで構成される通信ネットワークを物理ネットワークともいう。一方で、VNFを仮想ノード、VNF間の経路を仮想リンクとした通信ネットワークを仮想ネットワークともいう。

## 【 0 0 1 3 】

## &lt; 理論的構成 &gt;

以下、本実施形態の理論的構成について説明する。

## 【 0 0 1 4 】

40

始点（例えば、ユーザの所在地等）及び終点（例えば、サーバの所在地等）とサービス提供の際に利用するVNF（例えば、ファイアウォール等）との組み合わせで定義される仮想ネットワークと、この仮想ネットワークにより提供されるサービスとを同一視し、 $N_s$ 個のサービスを物理ネットワークに埋め込む問題を考える。すなわち、 $N_s$ 個のサービスをそれぞれ提供する $N_s$ 個の仮想ネットワークを物理ネットワークに埋め込む問題を考える。ここで、仮想リンクは任意の数の経路に分割が可能であり、物理ノードに接続された1つ又は複数の物理リンクに任意の割合で埋め込むことができる。

## 【 0 0 1 5 】

物理ネットワークのトポロジーを $g(N, L)$ と表記し、 $N$ は物理ノードの集合、 $L$ は物理リンクの集合を表すものとする。また、 $I_n$ 、 $L$ を物理ノード $n$ 、 $N$ に流入する物理

50

リンクの集合、 $O_n$ 、 $L$ を物理ノード $n$ 、 $N$ から流出する物理リンクの集合とする。また、サービスの集合を $S$ 、 $VNF$ の種類に関する集合を $V$ とする。なお、 $g$ や $N$ 、 $L$ 、 $S$ 、 $V$ 等はスク립ト文字（筆記体）で表記されるが、誤解が生じない限り、明細書のテキスト中では通常の文字で表記する。同様に、 $O_n$ や $I_n$ は黒板太字（中抜き文字）で表記されるが、誤解が生じない限り、明細書のテキスト中では通常の文字で表示する。その他の筆記体や中抜き文字についても同様である。

【0016】

このとき、各サービスを $g(V_s, E_s)$ と表記する。ただし、 $V_s$ 、 $V$ は $s$ 番目のサービスの $VNF$ 集合、 $E_s$ は $s$ 番目のサービスの仮想リンク集合である。なお、 $V$ にはサービスの始点ノードと終点ノードも含まれるものとする。

10

【0017】

また、 $s$ 番目のサービスの仮想リンク $e \in E_s$ を互換的に $(v_{s0}, v_d)$ とも表記する。ただし、 $v_{s0}$ は仮想リンク $e$ の始点ノード、 $v_d$ は仮想リンク $e$ の終点ノードを表す。

【0018】

サービスを物理ネットワークに埋め込んだ例を図1に示す。図1に示す例では、始点 $VNF1$ 、 $VNF2$ 、 $VNF3$ 、終点で構成される $s$ 番目のサービス $g(V_s, E_s)$ と、始点 $VNF2$ 、 $VNF3$ 、 $VNF4$ 、終点で構成される $s'$ 番目のサービス $g(V_{s'}, E_{s'})$ とを物理ネットワーク $g(N, L)$ に埋め込んだ場合を示している。具体的には、 $s$ 番目のサービス $g(V_s, E_s)$ は、物理ノード1、物理ノード3、物理ノード4、物理ノード2、物理ノード6に埋め込まれている。同様に、 $s'$ 番目のサービス $g(V_{s'}, E_{s'})$ は、物理ノード3、物理ノード5、物理ノード6、物理ノード2、物理ノード4に埋め込まれている。

20

【0019】

$s$ 番目のサービス（以下、「サービス $s$ 」ともいう。）で発生するトラフィック量を $\lambda_s$ とする。トラフィック量 $\lambda_s$ としては、例えば、データ転送レート $bps$ 等が挙げられる。将来の $VNF$ 割当てと経路決定を行う場合、トラフィック量 $\lambda_s$ は何等かの予測手法による予測値として得られることが想定される。例えば、予測手法としては、過去のトラフィック量の時系列データから将来のトラフィック量を予測するような自己回帰モデル等の時系列モデルを構築し、この時系列モデルから将来のトラフィック量の予測値を得る手法が挙げられる。また、他にも、例えば、過去数日間のトラフィック量の平均と分散を予測値とする手法等も考えられる。なお、どのような予測手法を用いた場合であってもトラフィック量 $\lambda_s$ は予測値であるため、不確かさが存在する（言い換えれば、トラフィック量 $\lambda_s$ は不確かな情報である）。このため、トラフィック量 $\lambda_s$ の不確かさを踏まえて、仮想ネットワークの埋め込み問題を考える必要がある。

30

【0020】

次に、各サービスで使用する $VNF$ 及び経路が必要とする電力量（例えば、1時間平均の電力消費量 $Wh$ 等）を考える。各 $VNF$ 及び経路が必要とする電力量は、サービスを提供する前の事前検証等により得られる最大消費電力や平均消費電力を活用する。一方で、各物理ノードに供給する電力源としては、再生可能エネルギーと契約電力を想定する。再生可能エネルギーの供給電力量は自然環境等に左右されるため、その予測値には不確かさが存在する。このため、各物理ノード $n$ が使用できると予測される最大電力量 $\mu_n$ （以下、使用最大電力量という。）にも不確かさが存在することになる。このため、使用最大電力量 $\mu_n$ の不確かさを踏まえて、仮想ネットワークの埋め込み問題を考える必要がある。

40

【0021】

そこで、以下では、トラフィック量の不確かさと再生可能エネルギーの不確かさとに対してロバストな仮想ネットワークの埋め込み問題を定式化する。その準備として、まず、トラフィック量の不確かさと各物理ノードの使用最大電力量の不確かさとを以下の多面体集合として記述する。

【0022】

【数1】

50

$$\Lambda_s := \{\lambda_s := \bar{\lambda}_s + \zeta_s \Delta \lambda_s : -1 \leq \zeta_s \leq 1, \sum_{s \in \mathcal{S}} |\zeta_s| \leq \gamma_\lambda\} \quad (1)$$

$$\mathcal{M}_n := \{\mu_n := \bar{\mu}_n + \zeta_n \Delta \mu_n : -1 \leq \zeta_n \leq 1, \sum_{n \in \mathcal{N}} |\zeta_n| \leq \gamma_\mu\} \quad (2)$$

10

ただし、  
【 0 0 2 3 】  
【 数 2 】

$$\bar{\lambda}_s \in \mathbb{R}_+$$

20

はサービス  $s$  で発生するトラフィック量のノミナル値を表し、  
【 0 0 2 4 】  
【 数 3 】

$$\bar{\mu}_n \in \mathbb{R}_+$$

30

は物理ノード  $n$  の使用最大電力量のノミナル値を表す。ここで、ノミナル値とは基準となる値のことを指し、例えば、平均値や中央値等の統計的指標を用いればよい。また、  
 $s \in \mathcal{S}$  はサービス  $s$  で発生するトラフィック量のノミナル値からの偏差、  
 $n \in \mathcal{N}$  は物理ノード  $n$  の使用最大電力量のノミナル値からの偏差であり、それぞれ不確かさを記述するパラメータである。

【 0 0 2 5 】

上記の不確かさ集合 ( 1 ) において、パラメータ  $\gamma_\lambda$  はノミナル値からどの程度偏差が存在するかを調整するパラメータである。同様に、上記の不確かさ集合 ( 2 ) において、  
パラメータ  $\gamma_\mu$  はノミナル値からどの程度偏差が存在するかを調整するパラメータである。  
これらのパラメータ  $\gamma_\lambda$  及び  $\gamma_\mu$  は、不確かさ集合の大きさを規定するパラメータということもできる。

40

【 0 0 2 6 】

以上の準備の下で、上記の不確かさ集合 ( 1 ) と ( 2 ) でそれぞれ記述されるトラフィック量の不確かさと物理ノードの使用最大電力量の不確かさとに対して、仮想ネットワーク全体の総コストを最小化する仮想ネットワーク埋め込み問題を以下の 2 - s t a g e ロバスタ最適化問題として定式化する。

【 0 0 2 7 】

【 数 4 】

50

$$\min_{x_n^{v,s}} \max_{\mu_n \in \mathcal{M}_n} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{v \in \mathcal{V}_s} c_n^{v,s} x_n^{v,s} + \max_{\lambda_s \in \Lambda_s} \min_{y_\ell^{e,s} \in \mathcal{Y}(\lambda_s, x_n^{v,s})} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{\ell \in \mathcal{L}} \sum_{e \in \mathcal{E}_s} b_\ell^{e,s} y_\ell^{e,s} \quad (3a)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{v \in \mathcal{V}_s} d_n^{v,s} x_n^{v,s} \leq \mu_n, \quad \forall n \in \mathcal{N}, \quad (3b)$$

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} x_n^{v,s} = 1, \quad \forall v \in \mathcal{V}_s, \forall s \in \mathcal{S}, \quad (3c)$$

$$\sum_{v \in \mathcal{V}_s} x_n^{v,s} \leq 1, \quad \forall n \in \mathcal{N}, \forall s \in \mathcal{S}, \quad (3d)$$

$$x_n^{v,s} \in \{0,1\}, \quad \forall n \in \mathcal{N}, \forall v \in \mathcal{V}_s, \forall s \in \mathcal{S}. \quad (3e)$$

ここで、 $x_n^{v,s}$  はバイナリ変数であり、サービス  $s$  の VNF  $v \in \mathcal{V}_s$  を物理ノード  $n \in \mathcal{N}$  に割り当てる場合は 1、それ以外の場合は 0 を取る。また、 $y_\ell^{e,s} \in \mathbb{R}$  ( $\ell$  は小文字の  $L$ ) は 0 以上 1 以下を取る連続変数であり、サービス  $s$  の仮想リンク  $e \in \mathcal{E}_s$  を物理リンク  $\ell \in \mathcal{L}$  に埋め込む割合を表す。目的関数 (3a) において、 $c_n^{v,s}$  と  $b_\ell^{e,s}$  ( $\ell$  は小文字の  $L$ ) はそれぞれ VNF 割当と経路決定に関連するコスト係数を表す。例えば、 $c_n^{v,s}$  と  $b_\ell^{e,s}$  をそれぞれ VNF と経路の使用に関する消費電力コストと設定すれば、目的関数値は物理ネットワーク全体の総消費電力を表す。また、例えば、 $c_n^{v,s}$  と  $b_\ell^{e,s}$  をそれぞれ VNF と経路の使用に関する処理時間コストと設定すれば、目的関数値はサービスの総処理時間を表す。

【0028】

不等式 (3b) は物理ノードの使用最大電力量に関する制約を表し、 $d_n^{v,s}$  は物理ノード  $n$  に VNF  $v \in \mathcal{V}_s$  を割り当てた場合の消費電力係数である。等式 (3c) は、各サービスの各 VNF は 1 つの物理ノードにしか割り当ててできないことを表している。一方で、不等式 (3d) は、1 つのサービスにおいて、複数の VNF を 1 つの物理ノードに割り当てることはできないことを意味している。この (3d) の制約条件は一見厳しいものであり、実用上の適用範囲を狭めているように思えるが、例えば、ある物理ノードに割り当てたい 2 つ以上の VNF の組み合わせを新たに 1 つの VNF として扱うことで、2 つ以上の VNF を 1 つの物理ノードに割り当てるのが可能となる。

【0029】

また、トラフィック量  $\mu_n$  と  $x_n^{v,s}$  を固定したときに取り得る  $y_\ell^{e,s}$  の集合  $\mathcal{Y}(\mu_n, x_n^{v,s})$  は、

【0030】

【数 5】

10

20

30

40

50

$$\mathcal{Y}(\lambda_s, x_n^{v,s}) := \{y_\ell^{e,s} : 0 \leq y_\ell^{e,s} \leq 1, \forall n \in \mathcal{N}, \forall e \in \mathcal{E}_s, \forall s \in \mathcal{S}, (4b) \text{ and } (4c) \text{ hold}\} \quad (4a)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{e \in \mathcal{E}_s} \lambda_s y_\ell^{e,s} \leq \phi_\ell, \quad \forall \ell \in \mathcal{L} \quad (4b)$$

$$\sum_{\ell \in \mathcal{O}_n} y_\ell^{e,s} - \sum_{\ell \in \mathcal{I}_n} y_\ell^{e,s} = x_n^{v_{so},s} - x_n^{v_{do},s}, \quad \forall n \in \mathcal{N}, \forall e \in \mathcal{E}_s, \forall s \in \mathcal{S} \quad (4c)$$

10

と記述される。ここで、不等式(4b)は物理リンクに関する容量制約であり、 $\phi_\ell$  ( $\ell$  は小文字の L) は物理リンク  $\ell \in \mathcal{L}$  の最大容量を表す。

【0031】

(3a) ~ (3e) 及び (4a) ~ (4c) で定式化される 2-stage ロバスト最適化問題は、2段階に分けて解が算出される。まず、第1段階目では、トラヒック量  $x_n^{v,s}$  が未知の下、使用最大電力量  $\mu_n$  が最悪となるケースのシナリオにおける VNF 割当  $x_n^{v,s}$  を決定する。第2段階目では、トラヒック量  $x_n^{v,s}$  が既知の下、仮想リンクの埋め込み割合  $y_\ell^{e,s}$  (つまり、経路) を決定する。これにより、トラヒック量の不確かさと再生可能エネルギーの不確かとを考慮した制御解 (つまり、VNF 割当  $x_n^{v,s}$  と経路決定  $y_\ell^{e,s}$ ) が得られ、これらの不確かさに対してロバストな仮想ネットワーク制御を実現することができる。以下、具体的な求解手順について説明する。

20

【0032】

(3a) ~ (3e) 及び (4a) ~ (4c) で定式化される 2-stage ロバスト最適化問題の求解アルゴリズムを C & CG (Column-and-constraint generation) 法に基づいて構築する。この C & CG 法は、元の問題をマスタープロブレムとサブプロブレムに分解し、それらを交互に解くことにより元の問題の解を得るアルゴリズムである。なお、以下、(3a) ~ (3e) をまとめて (3) と表記する。同様に、(4a) ~ (4c) をまとめて (4) と表記する。その他の式番号についても、複数の式番号をまとめて表記する場合には同様の方法を用いるものとする。

30

【0033】

ステップ K におけるマスタープログラムを以下のように定義する。

【0034】

【数6】

40

50

$$\min_{x_n^{v,s}} \max_{\mu_n \in \mathcal{M}_n} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{v \in \mathcal{V}_s} c_n^{v,s} x_n^{v,s} + \eta \quad (5a)$$

$$\text{s. t. } \eta \geq \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{\ell \in \mathcal{L}} \sum_{e \in \mathcal{E}_s} b_\ell^{e,s} y_\ell^{e,s}(k), \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (5b)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{e \in \mathcal{E}_s} \lambda_s(k) y_\ell^{e,s}(k) \leq \phi_\ell, \quad \forall \ell \in \mathcal{L}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (5c) \quad 10$$

$$\sum_{\ell \in \mathcal{O}_n} y_\ell^{e,s}(k) - \sum_{\ell \in \mathcal{I}_n} y_\ell^{e,s}(k) = x_n^{v_{so},s} - x_n^{v_{d},s}, \quad \forall n \in \mathcal{N}, \forall e \in \mathcal{E}_s, \forall s \in \mathcal{S}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (5d)$$

(3b), (3c), (3d), and (3e) hold,  $\eta \in \mathbb{R}$ .

ここで、上記の問題において、 $y_\ell^{e,s}(k)$  はステップ  $K - 1$  までに求めたサブプロブレム (後述) の解である。また、筆記体の  $K$  は、  
 【 0 0 3 5 】  
 【数 7 】

20

$$\mathcal{K} := \{1, 2, \dots, K - 1\}$$

である。以降では、マスタープロブレムの最適解を  $x_n^{*v,s}(K)$ ,  $y_\ell^{*e,s}(K)$  とする。特に、 $x_n^{*v,s}(K)$  はステップ  $K$  におけるサブプロブレムを解くために利用され、 $y_\ell^{*e,s}(K)$  は元の問題 (つまり、(3) 及び (4) で定式化される 2 - stage ロバスト最適化問題) の最適解の下界を導出するために利用される。また、マスタープロブレムは、 $x_n^{v,s}$ ,  $\mu_n$  に加えて、  
 【 0 0 3 6 】  
 【数 8 】

30

$$y_\ell^{e,s}(k), k \in \mathcal{K}$$

40

も決定変数として求解することに注意する。

【 0 0 3 7 】

次に、ステップ  $K$  におけるサブプロブレムを以下のように定義する。

【 0 0 3 8 】

【数 9 】

50

$$\max_{\lambda_s \in \Lambda_s} \min_{y_\ell^{e,s} \in \mathcal{Y}(\lambda_s, x_n^{*v,s}(K))} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{\ell \in \mathcal{L}} \sum_{e \in \mathcal{E}_s} b_\ell^{e,s} y_\ell^{e,s} \quad (6)$$

上記の問題では、目的関数が有限の値となるような最適値  $(\lambda_s^*(K), y_{1^{e,s}}^*(K))$  が存在すると仮定する。すなわち、サブプロブレム (6) は、マスタープロブレムの任意の解に対して実行可能であると仮定する。なお、マスタープロブレムのある解に対してサブプロブレム (6) が実行不可能である場合には、例えば、制御装置 10 が仮想ネットワークの埋め込みが不可能であることを示す情報を出力するようにしてもよい。

【0039】

上記のサブプロブレム (6) はバイレベルな最適化問題であるため、現在の形のまま求解することは困難である。そこで、これを回避するため、サブプロブレム (6) の内側の最小化問題を双対問題に変換し、以下の単レベルの最大化問題に帰着させる。

【0040】

【数10】

$$\begin{aligned} \max_{\lambda_s \in \Lambda_s, \pi_\ell \in \mathbb{R}, \xi_n^{e,s} \in \mathbb{R}, \theta_\ell^{e,s} \in \mathbb{R}} & - \sum_{\ell \in \mathcal{L}} \pi_\ell \phi_\ell + \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{e \in \mathcal{E}_s} \sum_{n \in \mathcal{N}} \xi_n^{e,s} (x_n^{v_{so},s} - x_n^{v_{ds},s}) - \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{\ell \in \mathcal{L}} \sum_{e \in \mathcal{E}_s} \theta_\ell^{e,s} \quad (7a) \\ \text{s. t. } & b_\ell^{e,s} + \lambda_s \pi_\ell - \xi_n^{e,s} \left( \sum_{\ell \in \mathcal{O}_n} y_\ell^{e,s} - \sum_{\ell \in \mathcal{I}_n} y_\ell^{e,s} \right) + \theta_\ell^{e,s} \geq 0, \forall n \in \mathcal{N}, \forall e \in \mathcal{E}_s, \forall s \in \mathcal{S}, \quad (7b) \\ & \pi_\ell \geq 0, \forall \ell \in \mathcal{L}, \quad \theta_\ell^{e,s} \geq 0, \forall n \in \mathcal{N}, \forall e \in \mathcal{E}_s, \forall s \in \mathcal{S}. \quad (7c) \end{aligned}$$

30

この最大化問題 (7) において、 $\lambda_s \in \mathbb{R}$ ,  $\pi_\ell \in \mathbb{R}$ ,  $\xi_n^{e,s} \in \mathbb{R}$ ,  $\theta_\ell^{e,s} \in \mathbb{R}$  はそれぞれ (4b), (4c),  $y_{1^{e,s}}^*(K)$  の制約に対する双対変数を表す。最大化問題 (7) は  $\lambda_s$  と  $\pi_\ell$  の積が存在するため、非線形最適化問題となる。本実施形態では、主双対内点法によって最大化問題 (7) を求解する。以降では、最大化問題 (7) の最適解を  $(\lambda_s^*(K))$  とし、この最適解に対応する目的関数値を  $Q(K)$  とする。

【0041】

ステップ  $K-1$  までにサブプロブレムで求めた  $(\lambda_s^*(K))$  に固定してマスタープロブレムを求解することにより、元の問題 (3) 及び (4) における最適解の下界は、

【0042】

【数11】

$$\psi_{LB}(K) = \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{v \in \mathcal{V}_s} c_n^{v,s} x_n^{*v,s} + \eta^*(K)$$

50

として与えられる。一方で、マスタープロブレムで求めた  $x_n^{*v,s}$  に固定してサブプロブレムを求解することにより、元の問題 (3) 及び (4) における最適解の上界は、

【0043】  
【数12】

$$\psi_{UB}(K) = \sum_{s \in S} \sum_{n \in N} \sum_{v \in V_s} c_n^{v,s} x_n^{*v,s}(K) + Q(K)$$

10

として与えられる。

【0044】

上記のマスタープロブレム (5) とサブプロブレム (7) とを交互に繰り返し解くことにより、上界と下界は最適解に漸近的に収束していくことが保証されている。

【0045】

< 制御装置 10 のハードウェア構成 >

次に、本実施形態に係る制御装置 10 のハードウェア構成について、図 2 を参照しながら説明する。図 2 は、本実施形態に係る制御装置 10 のハードウェア構成の一例を示す図である。

20

【0046】

図 2 に示すように、本実施形態に係る制御装置 10 は一般的なコンピュータ又はコンピュータシステムのハードウェア構成で実現され、入力装置 101 と、表示装置 102 と、外部 I/F 103 と、通信 I/F 104 と、プロセッサ 105 と、メモリ装置 106 とを有する。これらの各ハードウェアは、それぞれがバス 107 により通信可能に接続される。

【0047】

入力装置 101 は、例えば、キーボードやマウス、タッチパネル等である。表示装置 102 は、例えば、ディスプレイ等である。なお、制御装置 10 は、例えば、入力装置 101 及び表示装置 102 のうちの少なくとも一方を有していなくてもよい。

30

【0048】

外部 I/F 103 は、記録媒体 103a 等の外部装置とのインタフェースである。制御装置 10 は、外部 I/F 103 を介して、記録媒体 103a の読み取りや書き込み等を行うことができる。なお、記録媒体 103a としては、例えば、CD (Compact Disc)、DVD (Digital Versatile Disk)、SD メモリカード (Secure Digital memory card)、USB (Universal Serial Bus) メモリカード等が挙げられる。

【0049】

通信 I/F 104 は、制御装置 10 を通信ネットワークに接続するためのインタフェースである。プロセッサ 105 は、例えば、CPU (Central Processing Unit) や GPU (Graphics Processing Unit) 等の各種演算装置である。メモリ装置 106 は、例えば、HDD (Hard Disk Drive) や SSD (Solid State Drive)、RAM (Random Access Memory)、ROM (Read Only Memory)、フラッシュメモリ等の各種記憶装置である。

40

【0050】

本実施形態に係る制御装置 10 は、図 2 に示すハードウェア構成を有することにより、後述する仮想ネットワーク制御処理を実現することができる。なお、図 2 に示すハードウェア構成は一例であって、制御装置 10 は、他のハードウェア構成を有していてもよい。例えば、制御装置 10 は、複数のプロセッサ 105 を有していてもよいし、複数のメモリ装置 106 を有していてもよい。

50

## 【 0 0 5 1 】

< 制御装置 1 0 の機能構成 >

次に、本実施形態に係る制御装置 1 0 の機能構成について、図 3 を参照しながら説明する。図 3 は、本実施形態に係る制御装置 1 0 の機能構成の一例を示す図である。

## 【 0 0 5 2 】

図 3 に示すように、本実施形態に係る制御装置 1 0 は、予測値収集部 2 0 1 と、物理ネットワーク情報収集部 2 0 2 と、制御解算出部 2 0 3 と、制御部 2 0 4 とを有する。これら各部は、制御装置 1 0 にインストールされた 1 以上のプログラムがプロセッサ 1 0 5 に実行させる処理により実現される。

## 【 0 0 5 3 】

予測値収集部 2 0 1 は、各サービスのトラフィック量の予測値と、各物理ノードにおける使用最大電力量の予測値とを収集する。すなわち、予測値収集部 2 0 1 は、各サービスのトラフィック量のノミナル値及びその偏差と、各物理ノードにおける使用最大電力量のノミナル値及びその偏差とを取得する。

## 【 0 0 5 4 】

本実施形態では、各サービスのトラフィック量の予測値と各物理ノードにおける使用最大電力量の予測値とが時系列モデルを利用した予測アルゴリズム等によって得られることを想定する。例えば、将来の 1 日における V N F 割当と経路決定のスケジューリングを行う場合、予測値収集部 2 0 1 は、何等かの予測アルゴリズムにより、1 日先までのトラフィック量の予測値と使用最大電力量の予測値とを取得する。ここで、これらの予測値は、あるサンプリング間隔の平均値及び分散であると仮定する。この場合、ノミナル値には平均値、ノミナル値の偏差には分散を設定すればよい。なお、サンプリング間隔は、例えば、1 分や 1 時間等、V N F 割当や経路決定の制御仕様に応じて予め設定された時間間隔のことである。

## 【 0 0 5 5 】

なお、予測値収集部 2 0 1 によって収集されたノミナル値とその偏差は制御解算出部 2 0 3 に渡される。

## 【 0 0 5 6 】

物理ネットワーク情報収集部 2 0 2 は、物理ネットワークのトポロジーに関する情報や各種パラメータ（例えば、消費電力係数等）を収集する。

## 【 0 0 5 7 】

なお、物理ネットワーク情報収集部 2 0 2 によって収集された情報や各種パラメータ等は制御解算出部 2 0 3 に渡される。

## 【 0 0 5 8 】

制御解算出部 2 0 3 は、予測値収集部 2 0 1 によって収集された情報と物理ネットワーク情報収集部 2 0 2 によって収集された情報とを用いて、2 - s t a g e ロバスト最適化問題 ( 3 ) 及び ( 4 ) を求解するアルゴリズムを実行する。すなわち、制御解算出部 2 0 3 は、第 1 段階目でマスタープロブレム ( 5 ) とサブプロブレム ( 7 ) とを交互に繰り返し解くことにより V N F 割当  $x_n^{v, s}$  を算出した後、第 2 段階目でサブプロブレム ( 6 ) を解くことで経路決定  $y_{1e, s}$  を算出する。これにより、元の問題 ( 3 ) 及び ( 4 ) の最適な制御解を表す V N F 割当  $x_n^{v, s}$  と経路決定  $y_{1e, s}$  が得られる。

## 【 0 0 5 9 】

ここで、制御解算出部 2 0 3 には、第 1 の問題求解部 2 1 1 と、第 2 の問題求解部 2 1 2 とが含まれる。第 1 の問題求解部 2 1 1 は、マスタープロブレム ( 5 ) の解を算出すると共に、元の問題 ( 3 ) 及び ( 4 ) の最適解の下界を算出する。第 2 の問題求解部 2 1 2 は、サブプロブレム ( 7 ) やサブプロブレム ( 6 ) の解を算出すると共に、元の問題 ( 3 ) 及び ( 4 ) の最適解の上界を算出する。なお、例えば、上述したスケジューリングを行う場合、制御解算出部 2 0 3 は、サンプリング時間間隔毎に 2 - s t a g e ロバスト最適化問題 ( 3 ) 及び ( 4 ) を分割した上で、それぞれに関して独立に求解アルゴリズムを実行すればよい。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 6 0 】

制御部 2 0 4 は、制御解算出部 2 0 3 で算出された制御解により仮想ネットワークを制御する。これにより、最適な制御解が表す V N F 割当と経路決定が物理ネットワークに埋め込まれる（つまり、最適な V N F 割当と経路決定に変更される。）。

## 【 0 0 6 1 】

なお、一例として、将来の 1 日における V N F 割当と経路決定のスケジューリングを行う場合について説明したが、これは適用例の 1 つであって、これに限られない。例えば、最適な V N F 割当と経路をリアルタイムに算出し、仮想ネットワークを動的に制御する場合にも同様に適用可能である。具体的には、サンプリング点毎に各サービスのトラフィック量の予測値と各物理ノードにおける使用最大電力量の予測値とを収集できる場合には、その収集の都度、制御解算出部 2 0 3 で求解アルゴリズムを実行し、制御部 2 0 4 で V N F 割当と経路を更新してもよい。

10

## 【 0 0 6 2 】

< 仮想ネットワーク制御処理 >

次に、本実施形態に係る仮想ネットワーク制御処理の流れについて、図 4 を参照しながら説明する。図 4 は、本実施形態に係る仮想ネットワーク制御処理の流れの一例を示すフローチャートである。なお、埋め込み対象のサービス  $g(V_s, E_s)$  ( $s = 1, \dots, N_s$ ) は制御装置 1 0 に予め与えられているものとする。

## 【 0 0 6 3 】

まず、予測値収集部 2 0 1 は、各サービスのトラフィック量の予測値（ノミナル値及びその偏差）と、各物理ノードにおける使用最大電力量の予測値（ノミナル値及びその偏差）とを収集する（ステップ S 1 0 1）。

20

## 【 0 0 6 4 】

次に、物理ネットワーク情報収集部 2 0 2 は、物理ネットワークのトポロジに関する情報や各種パラメータ（例えば、消費電力係数等）を収集する（ステップ S 1 0 2）。ただし、物理ネットワークのトポロジや各種パラメータの値が前回収集した以降に変更されていない場合、本ステップは実行されなくてもよい。

## 【 0 0 6 5 】

続いて、制御解算出部 2 0 3 は、上記のステップ S 1 0 2 ~ ステップ S 1 0 3 で収集された情報を用いて 2 - s t a g e ロバスト最適化問題（3）及び（4）を求解するアルゴリズムを実行し、最適な制御解を算出する（ステップ S 1 0 3）。なお、本ステップの詳細については後述する。

30

## 【 0 0 6 6 】

そして、制御部 2 0 4 は、上記のステップ S 1 0 3 で算出された制御解により仮想ネットワークを制御する（ステップ S 1 0 4）。

## 【 0 0 6 7 】

ここで、上記のステップ S 1 0 3 における制御解の算出処理の詳細について、図 5 を参照しながら説明する。図 5 は、本実施形態に係る制御解の算出処理の流れの一例を示すフローチャートである。

## 【 0 0 6 8 】

まず、制御解算出部 2 0 3 は、ステップ  $K = 0$ 、 $U_B(0) =$  とし、初期値  $s(0)$  を設定する（ステップ S 2 0 1）。なお、初期値  $s(0)$  は  $s$  に属する任意の値に設定すればよい。また、このとき、第 1 段階目の終了条件を判定するためのパラメータ  $> 0$  を有限の値に設定してもよい。

40

## 【 0 0 6 9 】

次に、制御解算出部 2 0 3 は、第 1 の問題求解部 2 1 1 によりマスタープロブレム（5）を求解し、最適解  $x_n^{*V, S}(K)$  及び  $^*(K)$  と  $L_B(K)$  を得る（ステップ S 2 0 2）。

## 【 0 0 7 0 】

次に、制御解算出部 2 0 3 は、第 2 の問題求解部 2 1 2 によりサブプロブレム（7）を

50

求解し、最適解  $s^*(K)$  と  $U_B(K)$  を得る (ステップ S 2 0 3)。このとき、制御解算出部 2 0 3 は、 $U_B(K) = \min(U_B(K), U_B(K-1))$  により  $U_B(K)$  を更新する。

【0071】

次に、制御解算出部 2 0 3 は、予め設定されたパラメータ (又は、上記のステップ S 2 0 1 で設定されたパラメータ) を用いて、 $U_B(K) - L_B(K)$  を満たすか否かを判定する (ステップ S 2 0 4)。

【0072】

上記のステップ S 2 0 4 で  $U_B(K) - L_B(K)$  を満たすと判定されなかった場合、制御解算出部 2 0 3 は、ステップ K に 1 を加算してステップ K を更新し (ステップ S 2 0 5)、ステップ S 2 0 2 に戻る。これにより、 $U_B(K) - L_B(K)$  を満たすまでステップ S 2 0 2 ~ ステップ S 2 0 3 が繰り返し実行される。

10

【0073】

一方で、上記のステップ S 2 0 4 で  $U_B(K) - L_B(K)$  を満たすと判定された場合、制御解算出部 2 0 3 は、 $s^*(K)$  を固定した上で、第 2 の問題求解部 2 1 2 によりサブプロブレム (6) を求解し、最適解  $y_1^{*e, s}$  を得る (ステップ S 2 0 6)。

【0074】

以上により最適解  $x_n^{*v, s}(K)$  と  $y_1^{*e, s}$  が得られ、これが元の問題 (3) 及び (4) の最適な制御解 (最適解) となる。なお、上記のステップ S 2 0 6 ではサブプロブレム (6) を解く必要があるが、この最適化問題は単なる  $y_1^{e, s}$  に関する線形計画問題に帰着させることができるため容易に求解することが可能である。

20

【0075】

<まとめ>

以上のように、本実施形態に係る制御装置 1 0 は、上述した仮想ネットワーク制御処理により、トラヒック量の不確かさと再生可能エネルギーの不確かさに対してロバストな VNF 割当と経路決定が可能となる。

【0076】

トラヒック量の予測値と再生可能エネルギーを含む使用最大電力量の予測値とを用いて VNF 割当と経路決定を行った場合、それらの予測値に予測誤差が存在する限り、通信性能の劣化や輻輳の発生だけでなく、不足電力の購入によるコスト増加や再生可能エネルギーの利用率低下による環境負荷の増大等の問題が発生し得る。一方で、本実施形態に係る仮想ネットワーク制御処理は予測に不確かさが存在することを考慮したものであるため、通信性能の劣化や輻輳の発生を抑制すると共に不足電力の購入コストの発生や再生可能エネルギーの利用率低下の防止することが可能な VNF 割当と経路決定が可能となる。

30

【0077】

また、本実施形態に係る仮想ネットワーク制御処理 (特に、制御解の算出処理) は、2-stage ロバスト最適化と呼ばれる数理最適化の理論に基づいた求解アルゴリズムである。この理論では意志決定プロセスに基づいた 2 段階のロバスト最適化を行っており、単なるロバスト最適化よりも保守性を低減した解が得られることが知られている。このことは、トラヒック量と再生可能エネルギーの予測に誤差が存在していたとしても、通信性能の劣化や輻輳の発生を抑制すると共に不足電力の購入コストの発生や再生可能エネルギーの利用率低下を防止しつつ、保守性の低い VNF 割当と経路決定が可能であることを意味している。

40

【0078】

本発明は、具体的に開示された上記の実施形態に限定されるものではなく、請求の範囲の記載から逸脱することなく、種々の変形や変更、既知の技術との組み合わせ等が可能である。

【符号の説明】

【0079】

1 0 制御装置

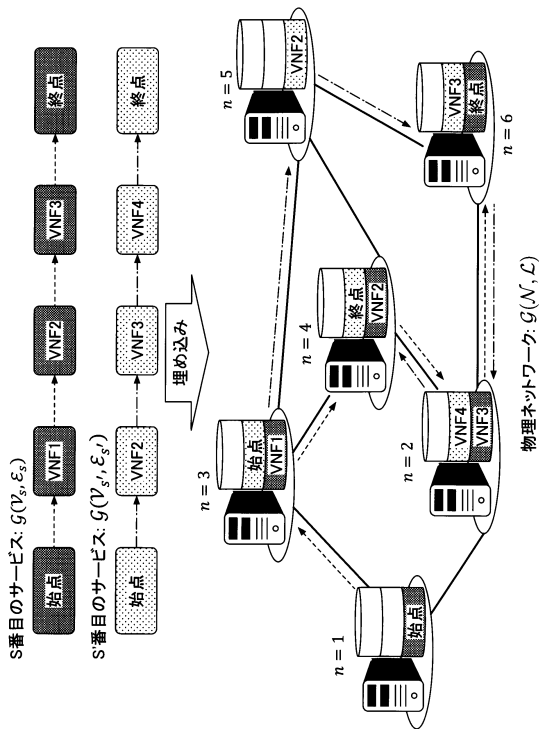
50

- 1 0 1 入力装置
- 1 0 2 表示装置
- 1 0 3 外部 I / F
- 1 0 3 a 記録媒体
- 1 0 4 通信 I / F
- 1 0 5 プロセッサ
- 1 0 6 メモリ装置
- 1 0 7 バス
- 2 0 1 予測値収集部
- 2 0 2 物理ネットワーク情報収集部
- 2 0 3 制御解算部
- 2 0 4 制御部
- 2 1 1 第 1 の問題求解部
- 2 1 2 第 2 の問題求解部

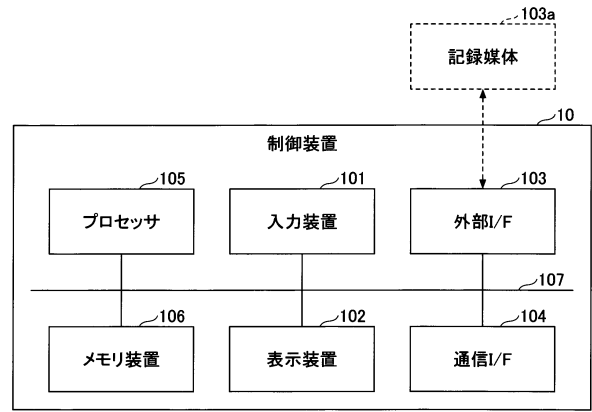
10

【 図 面 】

【 図 1 】



【 図 2 】



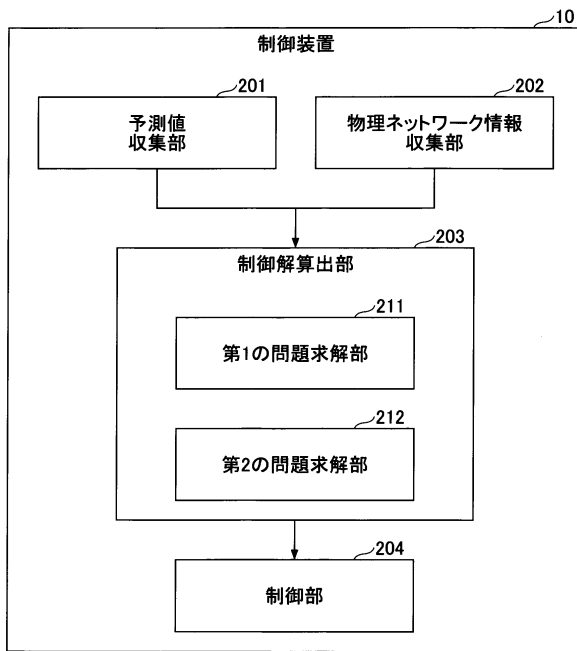
20

30

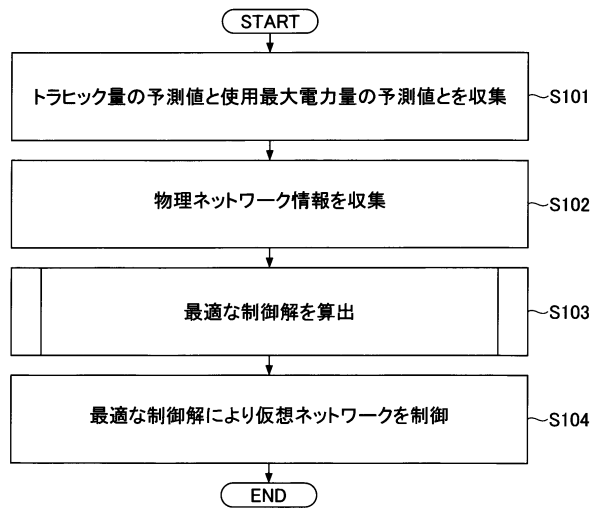
40

50

【図3】



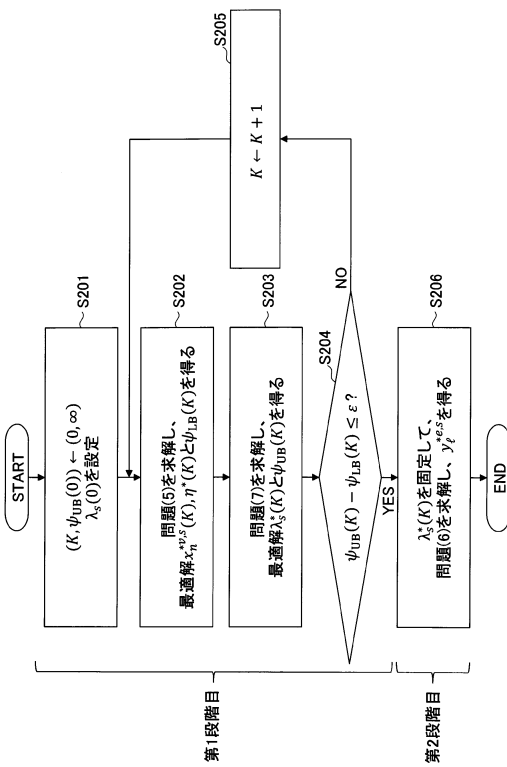
【図4】



10

20

【図5】



30

40

50

---

フロントページの続き

(72)発明者 中村 亮太

東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内

審査官 安藤 一道

(56)参考文献 中国特許出願公開第111047227(CN, A)

特開2020-127108(JP, A)

David Johansson, et al., On the Energy Cost of Robustness and Resiliency for Virtual network Function Placement, 2018 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks(NFV-SDN), IEEE, 2018年11月29日

Antonio Marotta, et al., A Power Efficient Robust Virtual Network Functions Placement Problem, 2016 28th International Teletraffic Congress(ITC28), IEEE, 2016年09月16日

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

H04L 41/40