

分散型リアルタイムプライシングにおける需要供給量予測と スケーラブルシミュレータの開発

Prediction of Demand and Supply for Distributed Real-Time Pricing and Development of Scalable Simulator

三浦 政司†
Masashi Miura

桜間 一徳†
Kazunori Sakurama

1. 背景・目的

エネルギー不足, 化石燃料の価格高騰, 原子力発電所の安全性問題など, エネルギーに関する諸問題への関心が世界中で高まる中, 風力発電や太陽光発電などの自然エネルギーの導入が積極的に進められている^[1]. 自然エネルギー利用の大きな問題点の一つは, 供給量の不安定性である. 自然エネルギーによる供給量は天候等の条件によって大きく変化し, その予測が難しい. 一方で, 電力系統内の周波数を保つために, 系統内での供給量と需要量(消費量)が一致している必要がある. そこで, 将来の自然エネルギー利用の割合が大きい電力網においては, 供給量予測が難しい中でいかにして供給量と需要量をマッチングさせるかが課題となり, 解決のための様々な手法が提案・研究されている^[2]. 中でも, 実時間における価格調整により消費量と供給量のバランスをとるリアルタイムプライシングが注目を集めている^[3].

リアルタイムプライシングの基本的な原理は, 需要量が大き過ぎる時は電力価格を上げることで需要量の抑制と供給量の増加を促し, 供給量が大き過ぎる時は電力価格を下げることで需要量の増加と供給量の抑制を促すというものである. すなわち, リアルタイムプライシングを伴う電力システムは, 需給バランスを観測量, 電力価格を制御入力とするフィードバック制御系とみなすことができる^[4]. この点に着目し, 著者らの研究グループは, フィードバック制御理論に基づいてリアルタイムプライシングを具現化するための設計原理を構築する研究に取り組んでいる. 特に本研究では, 一般的なリアルタイムプライシング研究において前提とされている集中的な処理を必要とせず, 各需要供給家がローカルな情報のみを用いて適切な価格を導出できるような分散型のシステムを実現することを目指している. 分散型リアルタイムプライシングを実現することができれば, 集中型と比較してスケーラビリティやディペンダビリティなどの観点で大きなメリットがある^[5]. さらに本研究では, 分散型リアルタイムプライシングを適用する電力ネットワークとして, 地域に分割された電力ネットワークを想定する. これは, 各地域内に多数の需要供給家が存在し, 地域ごとに需給バランスが求められる一方, 送電家によって地域間で電力を融通しあうような電力ネットワークである. このような電力ネットワークは送電ロスの抑制や事故対応時の系統切断の容易性などの面で優れており, 電力の自由化が進んだ将来の社会に対応している^[6].

これまでの研究において著者らは, 地域分割型電力網におけるリアルタイムプライシングの問題を制約付き最適化

問題として扱い, 分散協調制御の理論を応用した分散的な価格調整則による「交渉型リアルタイムプライシング」を提案している^{[7][8]}. これは, 各需要供給家や送電家(プレイヤー)が自身の需要供給量に基いた情報を周囲のプレイヤーと交換するプロセスを経て, 適切な価格を推定するという方法である.

本稿では交渉型リアルタイムプライシングの実システムへの適用に向けた取組みとして, 「交渉時間」を考慮した手法の提案を行う. これまでの研究では価格調整のための交渉プロセスは極めて短い時間に行われることを仮定してきた. しかし, 分散的なシステムにおいて個々の計算エージェントが高負荷な処理を行うのは望ましくなく, 実システムにおいては無視できない一定の交渉時間を要すると考えられる. 第 3 節で説明するように, 交渉に一定の時間を要する場合, 交渉を開始するための初期値として将来の時点における各プレイヤーの需要供給量が必要となる. しかし, 将来時点における需要供給量は, 提示価格と各プレイヤーの効用に基づく行動によって変化するため, 予め値を得ることはできない. 従って, それまでの履歴に基づく予測が必要となる. この際, 前述のように個々の計算エージェントは高い負荷や大きなメモリを要する処理を行わないことが望まれる. そこで本研究では, 提示価格と需要供給量の間の関係を線形に近似し, 逐次線形回帰法を用いることで個々の計算エージェントに負荷をかけることなく需要供給量を予測する手法を提案する.

また, 提案する手法の有効性検証や様々な条件下でのシミュレーションと結果に対する考察を効率良く行うために, グラフィカルでスケーラブルな独自のシミュレータ「RTPsim」を開発した. RTPsim は任意に設定したプレイヤー数や地域数に応じて自動でネットワークを生成し, 各種パラメータを変化させながらシミュレーションを行うことができる. また, 生成したネットワークやシミュレーション途中の各種状態量をグラフィカルに表示することができ, リアルタイムプライシングを伴う電力ネットワークの振る舞いを詳細に調べることができる.

本稿の構成は以下のようである. 第 2 節では, 地域に分割されたネットワークにおける交渉型リアルタイムプライシングについて定式化を行う. 第 3 節では交渉型リアルタイムプライシングにおける需要供給量予測の必要性について議論し, 逐次線形回帰法を用いた手法を提案する. 第 4 節では著者らが開発したシミュレータ RTPsim について, その基本的な構造と特徴を紹介する. そして第 5 節では, RTPsim を用いたシミュレーションにより本研究で提案する手法の有効性を検証する.

† 鳥取大学

2. 交渉型リアルタイムプライシングの概要

本研究ではリアルタイムプライシングの問題を制約付き最適化問題として扱い、分散協調制御の理論を応用した分散的な価格調整則を提案している。本節では対象とする電力ネットワークのモデルを示し、提案されているリアルタイムプライシングの概要を述べる。

2.1 電力ネットワークモデル

図1に示すような地域に分割されたネットワークを想定し、各地域における需要供給量がバランスをとるようリアルタイムプライシングにより価格を調整することを考える。地域数を $n \in \mathbb{N}$ とし、地域集合を $\mathcal{R} = \{1, 2, \dots, n\}$ とする。ある地域 $r \in \mathcal{R}$ には $n_r \in \mathbb{N}$ の需要供給家が含まれるとし、その集合を $\mathcal{P}_r = \{1, 2, \dots, n_r\}$ とする。 \mathcal{P}_r に含まれる i 番目の需要供給家の需要量または供給量 $x_{ri} \in \mathbb{R}$ とする。ここで x_{ri} が負の場合は需要量を、正の場合は供給量を意味する。地域間にはある地域から別の地域へ電力を送電する送電家があり、その集合を $\mathcal{D} = \{1, 2, \dots, m\}$ 、 $m \in \mathbb{N}$ とする。地域 $r \in \mathcal{R}$ を送電側とする送電家の集合を $\mathcal{D}_r^- \subset \mathcal{D}$ とし、地域 $r \in \mathcal{R}$ を受電側とする送電家の集合を $\mathcal{D}_r^+ \subset \mathcal{D}$ とする。また、送電家 $k \in \mathcal{D}$ の送電量を $\bar{x}_k \in \mathbb{R}$ とあらわす。 $k \in \mathcal{D}_r^-$ のとき地域 r から見た送電家 k は消費量が \bar{x}_k の需要供給家と同等であり、 $k \in \mathcal{D}_r^+$ のとき地域 r から見た送電家 k は供給量が \bar{x}_k の需要供給家と同等である。

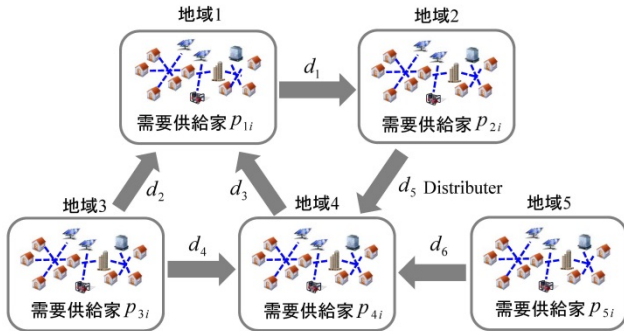


図1. 電力ネットワークモデル

2.2 制約付き最適化問題

電力ネットワークにおけるリアルタイムプライシングの問題を制約付き最適化問題として定式化する。需要供給家の需要供給量と送電家の送電量をまとめて決定変数として扱い、

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m) \in \mathbb{R}^v$$

と表す。ここで x_r は地域 $r \in \mathcal{R}$ に含まれる需要供給家の需要供給量で、 $x_r = (x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_{rn_r})$ であり、決定変数ベクトルの次数は $v = \sum_{r=1}^n n_r + m$ である。目的関数を $F(x)$ 、制約関数を $G(x)$ とすると、最適化問題は

$$\begin{cases} \text{maximize} & F(x) \\ \text{subject to} & G(x) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

と表記できる。

目的関数 $F(x) \in \mathbb{R}$ はプレイヤーの効用の和であり、それぞれの効用を $U_{ri}(x_{ri}) \in \mathbb{R}$ 、 $\bar{U}_k(\bar{x}_k) \in \mathbb{R}$ と表記すると、

$$F(x) = \sum_{r=1}^n \left(\sum_{i=1}^{n_r} U_{ri}(x_{ri}) \right) + \sum_{k=1}^m \bar{U}_k(\bar{x}_k) \quad (2)$$

とかける。制約関数 $G(x) \in \mathbb{R}^n$ は需給バランスに相当し、その r 番目の要素 $G_r(x) \in \mathbb{R}$ は地域 r の供給量の総和から消費量の総和を差し引いた値であり、下記のように書ける。

$$G_r(x) = \sum_{i=1}^{n_r} x_{ri} + \sum_{k \in \mathcal{D}_r^+} \bar{x}_k - \sum_{k \in \mathcal{D}_r^-} \bar{x}_k \quad (3)$$

2.3 最適化アルゴリズム

式(1)を満たす最適解を $x^* \in \mathbb{R}^v$ とすると、時間 $t \in \mathcal{R}$ の経過に対して

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x^* \quad (4)$$

と収束するような x の更新則を設計する。このような問題に対しては、ラグランジュの未定乗数法に基づく方法が適している^[9]。まず、ラグランジュの未定乗数

$$\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \in \mathbb{R}^n$$

を導入し、ラグランジアンを(5)のように定義する。

$$L(x, \lambda) = F(x) + \sum_{r=1}^n \lambda_r G_r(x) \quad (5)$$

ここで未定乗数 λ は電力価格に相当し、 r 番目の要素 $\lambda_r \in \mathcal{R}$ は地域 r における電力価格を示す。決定変数と未定乗数の更新則は、以下に示す手順Aのように与えられる。

<手順A>

A-i. 初期値 $x^{[0]} \in \mathbb{R}^v$ 、 $\lambda^{[0]} \in \mathbb{R}^n$ と正数 α 、 β を与え、ステップ $s = 0$ とする。

A-ii. ステップ s における初期値を $x_{ri}[0] = x_{ri}^{[s]}$ とし、

$$\begin{aligned} x_{ri}[k+1] &= x_{ri}[k] + \alpha \frac{\partial L}{\partial x_{ri}}(x[k], \lambda^{[s]}) \\ &= x_{ri}[k] + \alpha \left(\frac{\partial U_{ri}}{\partial x_{ri}}(x_{ri}[k]) + \lambda_r^{[s]} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

に従って決定変数 x_{ri} の更新を行い、次のステップの初期値 $x_{ri}^{[s+1]}$ を

$$x_{ri}^{[s+1]} = \lim_{k \rightarrow \infty} x_{ri}[k] \quad (7)$$

とする。

A-iii. 下記の式にしたがって λ の更新を行う。

$$\begin{aligned} \lambda_r^{[s+1]} &= \lambda_r^{[s]} - \beta \frac{\partial L}{\partial \lambda_r}(x^{[s+1]}, \lambda^{[s]}) \\ &= \lambda_r^{[s]} - \beta G_r(x^{[s+1]}) \end{aligned} \quad (8)$$

A-iv. ステップを s から $s+1$ に更新し, A-iiへ戻る.

ここで, 式(6)中の $\frac{\partial u_{ri}}{\partial x_{ri}}(x_{ri}[k])$ は地域 r に含まれる i 番目のプレイヤーの限界効用であり, 式(6)はプレイヤーの行動が, 限界効用とラグランジュ係数 $\lambda_r^{[s]}$ が釣り合うまで需要供給量(または送電量)を変化させるものであることを示している. すなわち, ラグランジュ係数 $\lambda_r^{[s]}$ は地域 r の電力価格に相当すると考えることができる^[10].

2.4 分散的価格調整則

適切な正数 α, β を与えれば手順Aに従って更新プロセスを繰り返すことで, 最適解 x^* を得ることができる. しかし, 式(8)で用いる $G_r(x^{[s+1]})$ は地域全体の需給バランスという大域的な情報であるため, 手順Aは分散的ではない. そこで, 地域内において構成されたプレイヤー間の情報ネットワーク(図1の青点線で示されるようなネットワーク)を通して, 各プレイヤーが価格の推定値に関する情報を交換し, 交渉を行うことで適切な価格を分散的に求めるような方法が提案されている^[8]. 地域 r に含まれる需要供給家 $i \in \mathcal{P}_r$ が持つ $\lambda_r^{[s]}$ の推定値を $\hat{\lambda}_{ri}^{[s]}$ とすると, 推定のための状態変数を $\theta_{ri}[h]$, 情報ネットワークにおけるエージェント i の隣接集合 \mathcal{N}_i , 適当な正数 c, γ に対して, 更新則は以下のように表される.

$$\begin{cases} \theta_{ri}[0] = \hat{\lambda}_{ri}^{[s]} - cx_{ri}^{[s+1]} \\ \theta_{ri}[h+1] = \theta_{ri}[h] - \gamma \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\theta_{ri}[h] - \theta_{rj}[h]) \\ \hat{\lambda}_{ri}^{[s+1]} = \lim_{h \rightarrow \infty} \theta_{ri}[h] \end{cases} \quad (9)$$

エージェントが送電家の場合も, 同様の式で表すことができる. この更新則は各エージェントが自身の情報と隣接集合からの情報のみを用いる分散的なものであり, 合意制御によって全ての i についての状態変数 $\theta_{ri}[h]$ を一致させる. 参考文献^[8]の議論により, 各地域の情報ネットワークが連結の場合, 合意した収束値 $\lim_{h \rightarrow \infty} \theta_{ri}[h]$ は式(8)により得られる $s+1$ ステップ目の価格 $\lambda_r^{[s+1]}$ と等しくなる. 手順AのうちA-iiiのプロセスを式(9)による交渉プロセスに置き換えることで, 分散的リアルタイムプライシングのモデルを構築することができる.

3. 需要供給量予測手法の提案

前節で示した交渉型リアルタイムプライシングにおいて, 交渉プロセスに要する時間を考慮すると, 価格調整を行うためにプレイヤーの需要供給量の収束値を予測する必要がある. 本節ではそのような予測の必要性について議論し, 実システムを想定した場合の手法として逐次線形回帰による予測を提案する.

3.1 需要供給量予測の必要性

第2節で定式化した交渉型リアルタイムプライシングのプロセスにおいて, 時間進行に相当する異なるステップが3種類あり, それぞれ s, k, h と記述している. これらの時間進行をタイムライン上にまとめると図2ようになる. s は価格提示の間に相当するステップであり, s が1ステッ

プ進むごとにプレイヤーに提示される価格が更新される. k は決定変数の更新間隔であり, プレイヤーが需要供給量を変化させる行動の時間進行を表す. k の進行に伴い需要供給量に変化し, 収束値として $x_{ri}^{[s+1]}$ が得られる. h は価格調整のための交渉のステップであり, h のステップが十分に進むと $\theta_{rj}[h]$ が収束し, 次の価格提示ステップで提示する価格 $\lambda_r^{[s+1]}$ が得られる. $\theta_{rj}[h]$ が収束するのに要する時間が, 交渉時間である. なお, 図2中の t_s は s ステップ目の開始時刻(価格 $\lambda_r^{[s]}$ が提示される時刻), τ_s は式(9)で示される交渉プロセスの開始時刻である.

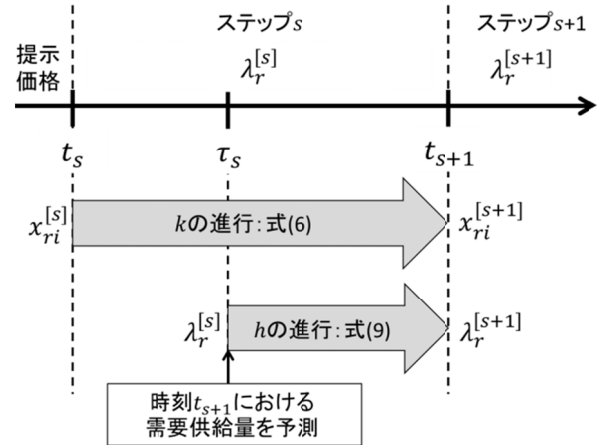


図2. 交渉型リアルタイムプライシングのタイムライン

ここで, 式(9)の第一式右辺に着目すると, s ステップ目における交渉プロセスの初期値を算出するために $x_{ri}^{[s+1]}$ の値が必要であることが分かる. これは, 図2のタイムライン上で, h ステップの進行の矢印の起点(時刻 τ_s)において $x_{ri}^{[s+1]}$ の情報が必要であることを意味する. しかし $x_{ri}^{[s+1]}$ は k ステップの進行の結果として時刻 t_{s+1} において得られる各プレイヤーの需要供給量の値である. すなわち, s ステップ目における交渉プロセスを開始するためには, 将来時点における需要供給量を予測することが必要となる.

3.2 問題設定

ここまで確認したように, 交渉型リアルタイムプライシングにおいて交渉時間を考慮すると, 交渉プロセスを開始するために将来時点のプレイヤーの需要供給量を予測する必要がある. 具体的には, 図2の時刻 τ_s において $x_{ri}^{[s+1]}$ を予測しなければならない. $x_{ri}^{[s+1]}$ は s ステップ目に提示された価格 $\lambda_r^{[s]}$ を用いて式(6)の決定変数更新プロセスを進めた結果として得られる収束値である.

式(9)で示される交渉プロセスの計算や需要供給量予測の計算は, プレイヤーに付随する計算エージェントが行う. 実システムにおける計算エージェントの実体は, スマートメーターのような計算・通信モジュールに相当すると考えられる. 時刻 τ_s までに計算エージェントが得ることのできる需要供給量予測のための情報としては, 0 ステップ目から $s-1$ ステップ目までの提示価格と, 提示価格に対する需要供給量の収束値が考えられる. しかし, 過去の履歴データを全て保持するためには大きなメモリを要し, 多数のデータを用いた計算は高負荷な処理となる. 一方, 分散システムにおける個々の計算エージェントは, 高い負荷や大きなメモリを要する処理を行わないことが望まれる. そこで,

各プレイヤーに付随する計算エージェントは、一つ前のステップにおいて提示された価格と、その価格に対する需要供給量の収束値の値のみを保持しているという条件下で、現在提示されている価格に対する需要供給量の収束値を予測しなければならないという問題を考える。この問題をこれまでに定式化した量を用いて記述すると、以下のようになる。

<問題>

$s-1$ ステップにおいて提示された価格 $\lambda_r^{[s-1]}$ と決定変数の収束値 $x_{ri}^{[s]}$ および s ステップにおける提示価格 $\lambda_r^{[s]}$ が与えられたとき、 s ステップにおける決定変数の収束値 $x_{ri}^{[s+1]}$ を予測せよ。

本稿ではこの問題に対して、逐次線形回帰を用いた予測手法を提案する。

3.3 逐次線形回帰による予測

3.2節で示された問題に対して、プレイヤーの効用関数が上に凸な2次関数であることを仮定し、線形回帰による予測を逐次的に行う手法を提案する。

まず、地域 r に含まれる需要供給家 $i \in \mathcal{P}_r$ の効用関数が上に凸な2次関数であると仮定する。このとき、効用関数は適当な実数パラメータ $A_{ri}, B_{ri}, C_{ri} \in \mathbb{R}$ を用いて

$$U_{ri}(x_{ri}) = A_{ri}(x_{ri} - B_{ri})^2 + C_{ri} \quad (10)$$

と書くことができる。ここで A_{ri} は需要供給量に対する効用の感度を表すパラメータで、 $A_{ri} < 0$ である。また、 B_{ri} は最大効用を与える需要供給量を表し、 C_{ri} は最大効用を表す。ある価格 $\lambda_r^{[s]}$ が提示された場合の式(6)による更新の収束値 $x_{ri}^{[s+1]}$ を求める。式(6)の平衡点として $x_{ri}[k+1] = x_{ri}[k] = x_{ri}^{[s+1]}$ を代入すると、下記が得られる。

$$\frac{\partial U_{ri}}{\partial x_{ri}}(x_{ri}^{[s+1]}) + \lambda_r^{[s]} = 0 \quad (11)$$

式(10)および式(11)より、提示価格 $\lambda_r^{[s]}$ と需要供給量の収束値 $x_{ri}^{[s+1]}$ の間には、式(12)のような線形の関係が成り立つ。

$$x_{ri}^{[s+1]} = -\frac{1}{2A_{ri}}\lambda_r^{[s]} + B_{ri} \quad (12)$$

そこで、エージェント i に価格 $\lambda_r^{[s]}$ が提示された場合の需要供給量収束値の予測値を $\hat{x}_{ri}^{[s+1]} \in \mathbb{R}$ として、次の式(13)に従って予測を行うとする。

$$\hat{x}_{ri}^{[s+1]} = a_{ri}^{[s]}\lambda_r^{[s]} + b_{ri}^{[s]} \quad (13)$$

式(12)と式(13)を比べると分かるように、 $a_{ri}^{[s]}$ 、 $b_{ri}^{[s]}$ はそれぞれ $-1/(2A_{ri})$ と B_{ri} に対応した係数である。過去の提示価格とそれに対する需要供給量収束値の組に対して最小二乗法を用いると式(14)のように回帰直線の係数が得られる^[11]。

$$\begin{cases} a_{ri}^{[s]} = \frac{s \sum_{l=0}^{s-1} \lambda_r^{[l]} x_{ri}^{[l+1]} - \sum_{l=0}^{s-1} \lambda_r^{[l]} \sum_{l=1}^{s-1} x_{ri}^{[l+1]}}{s \sum_{l=0}^{s-1} \lambda_r^{[l]^2} - (\sum_{l=0}^{s-1} \lambda_r^{[l]})^2} \\ b_{ri}^{[s]} = \frac{\sum_{l=1}^N \lambda_r^{[l]} \sum_{l=0}^{s-1} x_{ri}^{[l+1]} - \sum_{l=0}^{s-1} \lambda_r^{[l]} x_{ri}^{[l+1]} \sum_{l=1}^{s-1} x_{ri}^{[l+1]}}{s \sum_{l=0}^{s-1} \lambda_r^{[l]^2} - (\sum_{l=0}^{s-1} \lambda_r^{[l]})^2} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)では $l=0$ から $l=s-1$ までの全てのステップの提示価格 $\lambda_r^{[l]}$ と決定変数の収束値 $x_{ri}^{[l+1]}$ の和を計算しており、一つ前のステップにおける情報しか保持できないとした3.2節における問題設定の条件を満たしていない。そこで、和記号の部分で式(15)~(18)のような形で個別のパラメータとして考え、一つ前のステップの情報を用いて各パラメータを更新していくような逐次的な計算方法を提案する。

$$u_{xri}^{[s]} = \sum_{l=1}^s x_{ri}^{[l]} \quad (15)$$

$$u_{\lambda ri}^{[s]} = \sum_{l=0}^{s-1} \lambda_{ri}^{[l]} \quad (16)$$

$$\sigma_{\lambda ri}^{[s]} = \sum_{l=0}^{s-1} (\lambda_{ri}^{[l]})^2 \quad (17)$$

$$\sigma_{x\lambda ri}^{[s+1]} = \sum_{l=1}^s x_{ri}^{[l]} \sum_{l=0}^{s-1} \lambda_{ri}^{[l]} \quad (18)$$

これらのパラメータを用いて、次に示す手順Bを実行することになり、式(14)に相当する係数を逐次計算することができる。

<手順B>

B-i. $a_{ri}^{[s]}$ 、 $b_{ri}^{[s]}$ の他に逐次更新されるパラメータ $u_{xri}^{[s]}$ 、 $u_{\lambda ri}^{[s]}$ 、 $\sigma_{xri}^{[s]}$ 、 $\sigma_{x\lambda ri}^{[s]}$ を準備し、初期値を

$$a_{ri}^{[0]} = b_{ri}^{[0]} = u_{xri}^{[0]} = u_{\lambda ri}^{[0]} = \sigma_{xri}^{[0]} = \sigma_{x\lambda ri}^{[0]} = 0$$

とする。

B-ii. ステップ s において式(13)に従って需要供給量を予測し、式(9)で示される価格交渉をはじめめる。

B-iii. ステップ s の終わりに各パラメータを更新する。ステップ s において提示された価格 $\lambda_r^{[s]}$ 、その価格における需要供給量の収束値 $x_{ri}^{[s+1]}$ を用いて、各パラメータを以下のように更新する。

$$u_{xri}^{[s+1]} = u_{xri}^{[s]} + x_{ri}^{[s+1]} \quad (19)$$

$$u_{\lambda ri}^{[s+1]} = u_{\lambda ri}^{[s]} + \lambda_{ri}^{[s]} \quad (20)$$

$$\sigma_{\lambda ri}^{[s+1]} = \sigma_{\lambda ri}^{[s]} + (\lambda_{ri}^{[s]})^2 \quad (21)$$

$$\sigma_{x\lambda ri}^{[s+1]} = \sigma_{x\lambda ri}^{[s]} + x_{ri}^{[s+1]} \lambda_{ri}^{[s]} \quad (22)$$

$$a_{ri}^{[s+1]} = \frac{s\sigma_{x\lambda ri}^{[s+1]} - u_{xri}^{[s+1]}u_{\lambda ri}^{[s+1]}}{s\sigma_{\lambda ri}^{[s+1]} - (u_{\lambda ri}^{[s+1]})^2} \quad (23)$$

$$b_{ri}^{[s+1]} = \frac{\sigma_{\lambda ri}^{[s+1]}u_{xri}^{[s+1]} - \sigma_{x\lambda ri}^{[s+1]}u_{\lambda ri}^{[s+1]}}{s\sigma_{\lambda ri}^{[s+1]} - (u_{\lambda ri}^{[s+1]})^2} \quad (24)$$

B-iv. ステップの更新にあわせて、B-iiへ戻る。

手順Bによって逐次的に得られる係数 $a_{ri}^{[s]}$ 、 $b_{ri}^{[s]}$ を用いることで、式(13)により需要供給量の予測値 $\hat{x}_{ri}^{[s+1]}$ を計算することができる。このとき、各ステップの計算では一つ前のステップの情報しか用いておらず、3.2節で設定した問題の条件を満たす。すなわち、計算エージェントに高負荷な処理や大きなメモリを必要としない形で需要供給量を予測し、交渉のプロセスを開始することができる。

4. シミュレータの開発

第2節で定式化した交渉型リアルタイムプライシングおよび第3節で提案した交渉時間を考慮した場合の需要供給量予測手法の有効性を確認し、様々な条件下でのシステムの振る舞いを詳細に調べるために、グラフィカルかつスケラブルな独自のシミュレータ「RTPsim」を開発した(図3)。本節ではRTPsimのアーキテクチャと主な機能について紹介する。

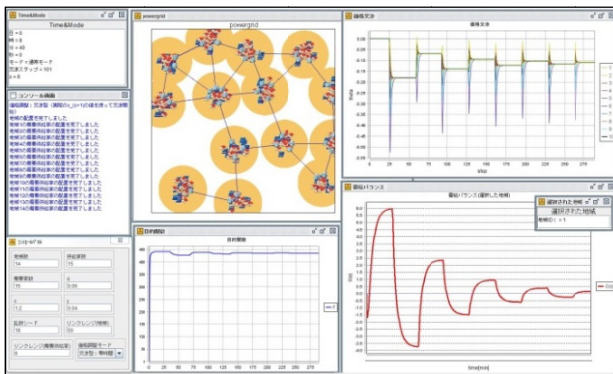


図3. RTPsimの動作画面

4.1 アーキテクチャ

RTPsimの開発には、構造計画研究所が開発したマルチエージェントシミュレーションプラットフォーム「artiosoc3.0」を用いた。artiosocはマルチエージェントシミュレーションの構築に便利な各種ライブラリを備え、エージェント行動の記述や出力設定を簡易な操作で行うことができる開発プラットフォームであり、JAVAを介して動作するグラフィカルなシミュレータを構築することができる^{[12][13]}。

artiosocは図4に示すUniv_Init(シミュレーション開始時の処理)やAgt_Init(エージェント生成時の処理)などの各プロセスのコーディングブロックを用意しており、シミュレータの開発者はそれぞれのコーディングブロックの中にプログラムコードを記述していく。構築されたシミュレーションでは図4に示すような順序で処理が進むよう自動的に設定されるため、開発者は時間ステップを進める処理やエージェントを切り替える処理を自身で記述する必要がなく、

簡単にエージェント行動の記述を行うことができる。

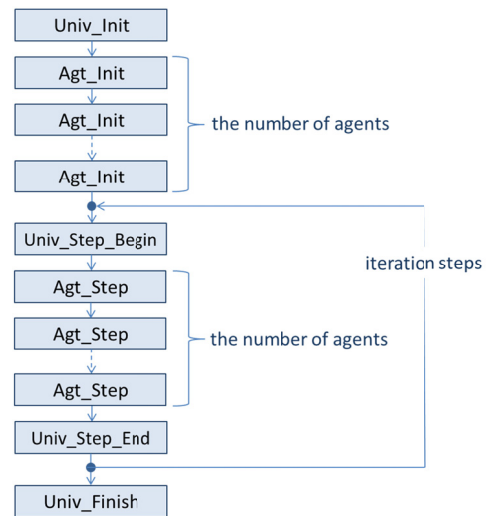


図4. artiosocにおけるコーディングブロックと処理フロー

RTPsimでは、第2節および第3節で示した交渉型リアルタイムプライシングの核となる処理がAgt_Stepのコーディングブロックに記述されている。このブロックは各エージェントの各ステップにおける行動を記述するブロックであり、式(6)と式(9)および需要供給量予測の処理等が記述されている。例えば式(6)は下記のように記述されている。

/* EXAMPLE CODE */

```
Agt_Step{
  My.U = Utility(My.x)
  My.dU = UtilityDef(My.x)
  My.x_next=My.x + alpha * (My.dU +
  My.lamda )
}
```

ここで「My.」という記述は現在処理されているエージェントインスタントを示す指定子であり、開発者はこの指定子を用いることでエージェント行動をシンプルかつ直感的に記述することができる。

4.2 機能と特徴

4.2.1 コントロールパネル

RTPsimでは、図5に示すようなGUIによるコントロールパネルから地域数、供給家数、需要家数、ゲインパラメータ、乱数シード、リンクレンジなどのパラメータを設定したり、価格調整モードを切り替えたりすることができる。



図5. コントロールパネル

ここで、ゲインパラメータ α は式(6)で、 c と γ は式(9)で使われている定数である。乱数シードはネットワークの自動生成に用いる乱数のシードを意味する。同じネットワーク構造のもとでシミュレーションを繰り返したいときは乱数シードの値を変えずに実行し、異なるネットワーク構造でのシミュレーションを行い場合は乱数シードを変更して実行すればよい。リンクレンジ(地域)とリンクレンジ(需要供給家)はそれぞれ送電ネットワークと情報ネットワークを構成する際の隣接かそうでないかを定めるパラメータである。リンクレンジを大きくすると、平均次数の高いネットワークが生成される。価格調整モードは、価格調整の初期値として用いる値を切り替える。「零時間」は交渉時間が極めて小さい時間で終了するとした場合に相当し、 s ステップ目における価格交渉の初期値に、 $s+1$ ステップ目における決定変数の収束値を使用する。「予測無」の場合は価格交渉に一定の時間を必要とするが、第3節で示したような予測を行わず、一つ前のステップにおける決定変数の収束値を価格交渉の初期値として用いる。「予測有」は第3節で提案した逐次線形回帰による需要供給量予測を適用した場合に相当する。

4.2.2 ネットワークの自動生成

RTPsim ではシミュレーションの開始時に、コントロールパネルから設定された地域数とエージェント数に応じて送電ネットワークおよび情報ネットワークが自動で生成され、図5のようにグラフィカルな形で表示される(マップ出力)。

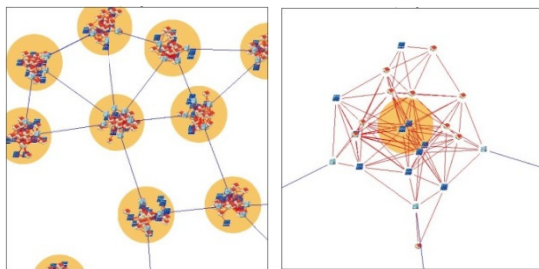


図5. ネットワークの表示(マップ出力)

まず、2次元空間上に設定された数の地域がランダムで配置され、リンクレンジ(地域)で設定した距離より近い地域同士が送電ネットワークで結ばれる。ここで、送電ネットワークは青い線で表示される(図5左)。同様にして、各地域に需要供給家がランダムで配置され、リンクレンジ(需要供給家)で設定した距離より近い需要供給家同士が情報ネットワークで結ばれる。マップ出力上では、情報ネットワークは赤い線で表示される(図5右)。

4.2.3 時系列グラフの逐次表示

シミュレーションを開始すると、目的関数、需給バランス、価格交渉の3つグラフが逐次表示される。図3に示したRTPsimの実行画面において表示されている3つのグラフウィンドウがこれらに相当する。需給バランスのグラフでは、ある一つ地域の需給バランス $G_r(x)$ の時系列が表示される。ネットワークを表示しているウィンドウ(マップ出力)で各地域をクリックすると、需給バランスのグラフで表示する地域を切り替えることができる。価格交渉のグラフは、式(9)で示される価格推定のための状態変数 $\theta_{ri}[h]$ の変化を示したものである。

5. シミュレーション結果

第4節で紹介したRTPsimを用いて、本稿で提案する手法の有効性を示すためのシミュレーションを行った。今回のシミュレーションケースでは、地域数を15とし、各地域に需要供給家を20配置して図6のようなネットワークを構築した。効用関数は各エージェントに対して適当な上に凸な2次関数を用意し、ゲインパラメータには適当な正数を設定した。ケースIでは、各エージェントが第3節で示した需要供給量予測を行うとした。すなわち、過去の価格に対する需要供給量の値を用いて式(13)の回帰直線を逐次更新し、次のステップ初めの需要供給量を予測して価格調整の初期値に用いた。比較のためのケースIIでは状態量予測を行わず、価格調整をはじめめる時点における需要供給量を代わりに用いた。

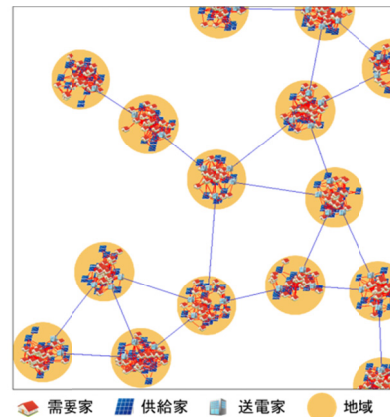


図6. シミュレーションケースのネットワーク

上記のような条件のもとに数値シミュレーションを行った結果を以下に示す。時系列グラフは、artisocを用いたシミュレータからデータを出力したものを、あらためて別のグラフ描画ソフトに読み込んで作成したものである。図7はケースIにおける、ある地域の価格交渉経過を示すグラフであり、横軸は経過時間、縦軸は式(9)における価格推定のための状態変数 $\theta_{ri}[h]$ の値である。各ステップにおいて各エージェントの状態変数が同一の値に速やかに収束していることが分かる。ケースIでは価格交渉を開始するための初期値に、予測した需要供給量を用いている。

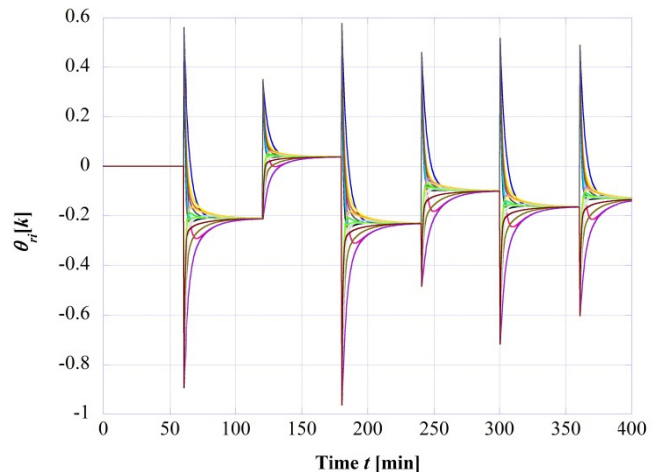


図7. 状態変数 $\theta_{ri}[h]$ の時系列グラフ(ケースI)

図8にはケースIにおける各地域の制約関数 $G_r(x)$ の時間変化を示す。 $G_r(x)$ が正の場合は電力過剰, 負の場合は電力不足を意味する。図11のグラフから分かるように, ケースIの場合は各地域の制約関数 $G_r(x)$ がゼロに収束し, 需給バランスがとれた状態を実現できている。一方, ケースIIにおける $G_r(x)$ の時間変化は図9のようになり, 発散している。これは, 需要供給量予測を行わないことで適切な価格調整ができなかったためである。これらの結果より, 本研究が提案する交渉型リアルタイムプライシングの手法および逐次線形回帰法による予測手法の有効性を確認することができた。

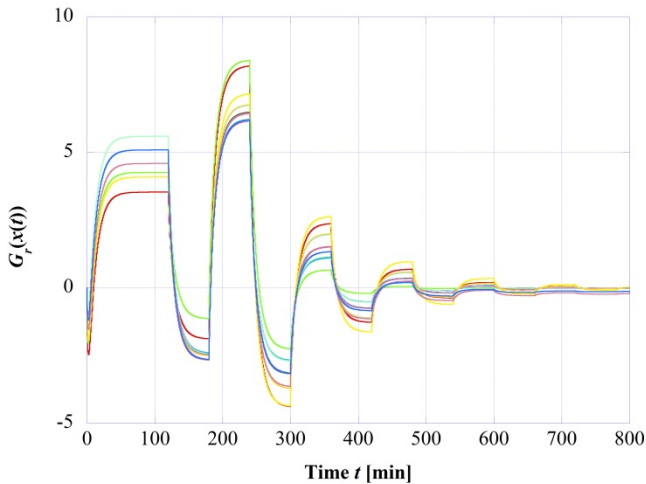


図8. 需給バランス $G_r(x)$ 時系列グラフ(ケースI)

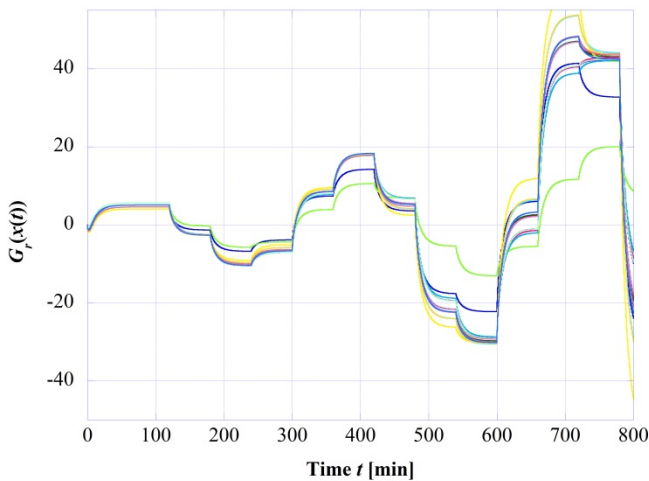


図9. 需給バランス $G_r(x)$ 時系列グラフ(ケースII)

6. まとめ

本研究ではリアルタイムプライシングの問題を制約付き最適化問題として扱い, 分散協調制御の理論に基づく交渉型価格調整則を提案している。本稿では価格調整のための交渉に一定の時間を要する場合に問題となる要供給量予測について, その必要性を確認するとともに逐次線形回帰を用いた方法を提案した。また提案手法の有効性の確認や, 今後のさらなる研究のために, グラフィカルかつスケラブルなリアルタイムプライシングのためのシミュレータRTPsimを開発し, その機能と特徴について紹介した。最

後に, RTPsimを用いたシミュレーションにより, 提案手法が有効であることを示した。今後は提案するシステムのより詳しい振る舞いを調べるため, 様々なネットワーク規模や構造, 様々なゲインパラメータのもとでのシミュレーションを行う必要がある。その際に, 今回構築したシミュレータRTPsimを活用する予定である。なお, RTPsimは下記のWEB上に公開しており, 下記のURLよりダウンロードして実行することができる。

RTPsimのWEBサイト: <http://tottori-icee.jp/rtpsim/>

謝辞

本研究の一部は, JST CREST の助成を受けた。記して, 謝意を表したい。

参考文献

- [1] J. Momoh, "Smart Grid -Fundamentals of Design and Analysis," Wiley-IEEE Press (2012).
- [2] E. Bitar, P. P. Khargonekar, and K. Poolla, "Systems and control opportunities in the integration of renewable energy into the smart grid," in The 18th IFAC World Congress (2011).
- [3] W. Berger and F. C. Schewpe, "Real time pricing to assist in load frequency control," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 4, No. 3, pp. 920-926 (1989).
- [4] M. Roozbehani, M. Dahleh and S. Mitter, "On the stability of wholesale electricity markets under real-time pricing," IEEE Conf. on Decision and Control (2010).
- [5] D. P. Bertekas, J. N. Tsitsiklis, "PARALLEL AND DISTRIBUTED COMPUTATION," Athena Scientific (1997).
- [6] A. H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia, "Optimal resi-dential load control with price prediction in real-time electric-ity pricing environments," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 1, no. 2, pp. 120-133 (2010).
- [7] 桜間一徳, 三浦政司, "マルチエージェントシステムの制約付き分散最適化とリアルタイムプライシングへの応用," 第1回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム (2014).
- [8] K. Sakurama and M. Miura, "Complete Distributed Optimization with Constraints on Networked Multi-Agent Systems," The 14th European Control Conference (2015).
- [9] D. G. Luenberger and Y. Ye, "Linear and Nonlinear Programming," 2nd ed., Kluwer Academic Publishers (2003).
- [10] D. Friedman, "Price Theory: An Intermediate Text," South-Western Publishing Co. (1990)
- [11] 中川徹, 小柳義夫, "最小二乗法による実験データ解析," 東京大学出版会, pp.30 (1982).
- [12] 山影進, "人工社会構築指南," 書籍工房早山 (2008).
- [13] Y. Kazuya. "International Relations and Agent-based Modeling: A New User-friendly Simulator? Artisoc," Proceedings of annual meeting of the International Studies Association 48th Annual Convention, Chicago (2007).