

明 細 書

発明の名称： 情報提供装置および情報提供方法

技術分野

[0001] 本発明は、情報提供装置および情報提供方法に関するものであり、具体的には、金融商品に関する情報を効率的かつ精度良好に推定する技術に関する。

背景技術

[0002] 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、いわゆる組合せ最適化問題の概念は、交通渋滞解消、グローバルサプライチェーンにおける物流コスト低減、など実社会における複雑な問題にも適用される。

[0003] 一方、そうした問題においては解候補が爆発的に多くなるため、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い。

[0004] 例えば、量子コンピュータに関連する従来技術としては、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 $t = \tau$ 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 1 参照）などが提案されている。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：WO 2 0 1 6 / 1 5 7 3 3 3

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] ところが、金融商品に関して、上述のごとき量子コンピュータ技術を適宜に適用する形態は提案されていない。例えば、金融商品の価格は、その金融商品に影響を及ぼす様々な要因（例：他の金融商品の価格など）により変動する。また、その要因自体も変動し、かつ要因同士も影響しあっている。しかも、そうした変動の程度も様々である。

[0007] このような状況に対応して金融商品の価格推定等を行うに際し、一般的なコンピュータを採用すれば、上述の要因数に応じて計算量が指数関数的に増加し、膨大な時間を要するかオーバーフローに至ることとなる。

そこで本発明の目的は、金融商品に関する情報を効率的かつ精度良好に推定する技術を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0008] 上記課題を解決する本発明の情報提供装置は、各種金融商品の価格情報を格納した記憶部と、前記価格情報が示す前記金融商品それぞれの実価格と当該金融商品それぞれに関して他金融商品との感応度に基づき定まる推定価格に関し、前記金融商品における価格増減事象をスピンとし、前記金融商品の間における価格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演算部とを有し、前記演算部は前記演算の結果に基づき、前記金融商品のうち少なくともいずれか1つの金融商品について、将来における価格に関する情報を所定装置に出力することを特徴とする。

[0009] また、本発明の情報提供方法は、各種金融商品の価格情報を格納した記憶部を備える情報処理装置が、前記価格情報が示す前記金融商品それぞれの実価格と当該金融商品それぞれに関して他金融商品との感応度に基づき定まる推定価格に関し、前記金融商品における価格増減事象をスピンとし、前記金融商品の間における価格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し、前記演算の結果に基づき、前記金融商品

のうち少なくともいずれか1つの金融商品について、将来における価格に関する情報を所定装置に出力することを特徴とする。

発明の効果

[0010] 本発明によれば、金融商品に関する情報を効率的かつ精度良好に推定可能となる。

図面の簡単な説明

[0011] [図1]本実施形態の情報提供装置を含むネットワーク構成図である。

[図2]本実施形態における通貨ペアの感応状況例1を示す図である。

[図3]本実施形態における通貨ペアの感応状況例2を示す図である。

[図4]本実施形態における情報提供装置のハードウェア構成例を示す図である。

[図5]本実施形態におけるタイミングチャート例を示す図である。

[図6]本実施形態における基本概念に関するフローチャートを示す図である。

[図7]本実施形態の価格情報のデータ構成例を示す図である。

[図8]本実施形態の感応度情報のデータ構成例を示す図である。

[図9]本実施形態における情報提供方法のフロー例1を示す図である。

[図10]本実施形態における画面例1を示す図である。

[図11]本実施形態における画面例2を示す図である。

[図12]本実施形態における価格推定例1を示す図である。

[図13]本実施形態における価格推定例2を示す図である。

[図14]本実施形態における情報提供方法のフロー例2を示す図である。

[図15]本実施形態における画面例4を示す図である。

発明を実施するための形態

[0012] ———アニーリングマシンについて———

上述の特許文献1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。

[0013] 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。

[0014] 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 adiabatic 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。

[0015] 問題を設定した物理系のハミルトニアンを $\hat{H}_p$ とする。但し、演算開始時点ではハミルトニアンを $\hat{H}_p$ 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 $\hat{H}_0$ とする。次に十分に時間を掛けてハミルトニアンを $\hat{H}_0$ から $\hat{H}_p$ 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 $\hat{H}_p$ 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 τ とすればハミルトニアンは式（1）となり、

[式1]

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

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。

[式2]

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

[0016] 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。

[0017] 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。

[0018] 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、それはディ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ィ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ィコヒーレンスに対して頑強であると考えられている。

[0019] 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。

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。

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。

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。

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。

[0020] 本実施形態における情報提供装置としては、上述の断熱量子計算を行うア

ニーリングマシンを想定するが、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情報提供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。具体的には、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する方式も含む。また、アニーリング方式以外にてイジングモデルを実現するハードウェアでもよい。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も含む。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。

[0021] ーネットワーク構成ー

以下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。図1は、本実施形態の情報提供装置100を含むネットワーク構成図である。

[0022] 図1に示す情報提供装置100は、金融商品に関する情報を効率的かつ精度良好に推定するコンピュータ装置であり、具体的には、一例としてアニーリングマシンを想定する。ただし、アニーリングマシンの概要は特許文献1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)。

[0023] 本実施形態の情報提供装置100は、インターネットなどの適宜なネットワーク10を介して、ユーザ端末200および金融情報提供配信システム300と、データ通信可能に接続されている。

このうちユーザ端末200は、情報提供装置100から金融商品に関する情報提供を受ける端末である。

このユーザ端末200のユーザとしては、具体的には、金融機関や保険会社など機関投資家の担当者や、或いは一般の個人投資家などを想定できる。

[0024] また、情報提供装置100が提供する金融商品に関する情報は、所定の金融商品に関する、現時点において確定している価格と所定の未来に関して予想される推定価格との差異の有無および程度、を示す情報を想定できる。該

当価格間に差異が存在し、またその差異が大きいほど、いわゆるサヤ取りの機会として意義が大きい。よって、こうした情報の提供を受ける上述のユーザは、好適な投資機会を適宜な精度で認識可能となる。

一方、金融情報配信システム300は、各種金融商品の価格情報を情報提供装置100に配信するシステムである。

この金融情報配信システム300は、種々の金融機関や証券会社、政府機関、など金融商品の価格情報を保持する組織が運営するサーバ装置を想定できる。

[0025] 上述の各種金融商品としては、例えば、株式、先物商品、外国為替、といったものを想定できる。また価格情報は、株価指数、商品先物価格、外国為替相場、外国為替先渡し相場、ロング／ショート未決済ポジション比率、各種指標のボラティリティ、リスクリバーサル、といったものを想定できる。

[0026] 上述の外国為替相場における通貨ペアのように、相互に依存関係を持った複数要素（通貨ペア同士および通貨ペアをなす通貨同士、の両方の概念含む）が逐次変化している場合、とある局面においては不均衡な状態が発生していると想定される。

[0027] こうした状況の具体的なイメージとして、或る時点（市場で均衡が取れた状態）における通貨ペアそれぞれのレートが、そこから一定時間経過して通貨ペア各間の感応度に応じて変化する状況を、図2および図3で例示した。

[0028] これは、例えば、外国為替相場に関して正の相関「0.7」がある通貨ペア、USD／JPYとEUR／JPYの間で、USD／JPYのレートが上昇しても、他方のEUR／JPYのレートがまだ相応の上昇を示していない局面において、このEUR／JPYに関しては本来落ち着くべきレート（USD／JPYとの感応度に応じて推定される価格すなわち推定価格）との乖離が存在する。これが不均衡な状態と言える。

[0029] そこで、情報提供装置100は、金融商品の価格に関して上述の乖離を特定することで不均衡の発生状態（乖離が大きいほど不均衡であるとする）の評価を行い、その情報をユーザ端末200に配信する。

[0030] 従来であれば、上述の推定価格や乖離の算出に際し、要素すなわち金融商品の価格情報の増加に対して計算量が指数関数的に増加し、計算完了までに長時間を要するが、アニーリングマシンを使用した情報提供装置100を採用することで、要素の増加にさほど依存せず計算を行うことが可能となる。

[0031] ーハードウェア構成ー

また、本実施形態の情報提供装置100のハードウェア構成は、図4に以下の如くとなる。すなわち情報提供装置100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記憶部101、RAMなど揮発性記憶素子で構成されるメモリ103、記憶部101に保持されるプログラム102をメモリ103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CPUなどの演算部104、ネットワーク10と接続し他装置との通信処理を担う通信部105、を備える。

[0032] 情報提供装置100がスタンドアロンマシンである場合、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、処理データの表示を行うディスプレイ等の出力装置、を更に備えるとすれば好適である。

[0033] また、記憶部101内には、本実施形態の情報提供装置として必要な機能を実装する為のプログラム102に加えて、金融商品の価格情報125および感応度情報126が少なくとも記憶されている。ただし、これら情報についての詳細は後述する。

[0034] また、プログラム102、すなわちアニーリングマシンとしての動作を実装するアルゴリズムは、解くべき課題であるイジングモデル1021の情報を保持する。このイジングモデル1021は、情報提供の対象となる金融商品やそれに影響を与える他の金融商品の各種情報に基づき管理者等が予め設定しておくものとなる。

[0035] 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

解率に関しで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。そこで本発明では、演算部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・装置を実現する。

[0036] 以上の概念に基づき、以下の例では断熱量子計算との関連性を説明しながら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装置に関して述べる。

[0037] こうした前提での情報提供装置 100 は、 N 個の変数 s_j^z ($j = 1, 2, \dots, N$) が $-1 \leq s_j^z \leq 1$ の値域を取り、局所場 g_j と変数間相互作用 J_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, N$) によって課題の設定がなされる。

[0038] また演算部 104 では、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 g_{pina} あるいは g_{pinb} を用いて $B_j^z(t_k) = \{\sum_i J_{ij} S_i^z(t_{k-1}) + g_j + sgn(s_j^z(t_{k-1})) \cdot g_{pina}\} \cdot t_k / \tau$ あるいは $B_j^z(t_k) = \{\sum_i J_{ij} S_i^z(t_{k-1}) + g_j + g_{pinb} \cdot S_j^z(t_{k-1})\} \cdot t_k / \tau$ 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、 $S_j^z = -1$ 、 $S_j^z > 0$ ならば、 $S_j^z = 1$ として解を定める。

[0039] 係数 g_{pinb} 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 $\delta g_{j'}$ 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 $\delta g_{j'}$ は、例えば $|J_{ij}|$ の平均値の 10% から 100% の値である。

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、アニーリングマシンの基本的原理を述べる。

- [0040] 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).)。

[式3]

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

- [0041] 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±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±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±1であることによりイジングスピン系となっている。

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。

- [0042] 例えば、金融商品価格の増加と減少を±1に対応付けることや、ロジック回路のhighとlowを±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±1に対応付けることや0, π の位相を±1に対応付けることも可能である。

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。

[式4]

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

- [0043] γ 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。

[0044] 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($\gamma > 0$)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(ブロッホベクトル)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。

[式5]

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

[0045] 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、 $\langle \cdot \rangle$ を量子力学的期待値として $\langle \hat{\boldsymbol{\sigma}} \rangle = \mathbf{B} / |\mathbf{B}|$ 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。

[0046] 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。

[式6]

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

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。

[式7]

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

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。

[0047] 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。

[0048] 図５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（１）を示す。図５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 $\hat{\sigma}_j$ ではなく s_j により表した。またそれに伴い、図５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の有効磁場 B_j が印加され、全スピン S_j が右向きに初期化される。

[0049] 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。

[0050] 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５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 $\langle \hat{\sigma}^y \rangle = 0$ となるためである。

[0051] 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）。

[0052] また γ は一定なので $B_j^x(t) > 0$ ($\gamma > 0$) あるいは $B_j^x(t) < 0$ ($\gamma < 0$) が成り立つ。この場合、2次元スピンの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次元スピンのベクトルが定まる。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。

図5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。

[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。

[式9]

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

[式10]

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

以下、図5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。

[0053] 古典系ではスピンのベクトルの大きさは1である。この場合スピンの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 θ

を用いて $S_j^z(t_k) = \sin \theta$ 、 $S_j^x(t_k) = \cos \theta$ と記述される。

[0054] 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。

[0055] 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、 τ と γ 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。

[0056] 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。

[0057] 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^{zd} は、 $S_j^{zd} = -1$ 或 1 になる必要があり、 $S_j^z(\tau) > 0$ ならば $S_j^{zd} = 1$ 、 $S_j^z(\tau) < 0$ ならば $S_j^{zd} = -1$ とする。

[0058] 図6に、上述の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 $t_m = \tau$ である。図6のフローチャートの各ステップ $s1 \sim s9$ は、時間 $t = 0$ から $t = \tau$ に到る図5のタイミングチャートの、ある時刻での処理に対応している。すなわち、フローチャートのステップ $s2$ 、 $s4$ 、 $s6$ 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 $s8$ において、 $s_j^z < 0$ ならば $S_j^{zd} = -1$ 、 $S_j^z > 0$ ならば、 $S_j^{zd} = 1$ とすることにより定める($s9$)。

[0059] ここまでは課題が式(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。

- [0060] ここでの具体的課題すなわちイジングモデル1021は、金融商品のうち通貨ペアの価格予測の問題を想定する。この場合、局所場 g_j として、金融商品の実価格（例：外国為替相場、外国為替先渡し相場、株式指数、商品先物価格、ロング／ショート未決済ポジション比率、各種指標のボラティリティ、リスクリバーサルなど）と推定価格をそれぞれ想定する。なお、推定価格は、現時点において確定している価格（実価格）を起点とし、対象となる通貨ペアに関して他の金融商品との感応度に基づき定まる価格である。
- [0061] また、 σ_j^2 は、所定の通貨ペアの価格増減に、他の金融商品の価格増減（株価指数等の他、他の通貨ペアの概念も含みうる）を影響させるための変数と考える。通貨ペアのレートと他の金融商品の価格との相関強度すなわち感応度は、変数間相互作用 J_{ij} を通して表現する。なお、本発明で説明する感応度は為替と株式との相関強度（影響度合いともいえる）だけでないのは上述した通りである。
- [0062] 以上のような考察を通して変数間相互作用 J_{ij} を具体的に設定し、式（3）で表されるイジングモデル1021の基底状態探索、すなわち上述の実価格と推定価格との差異が最小となる基底状態の探索を通して、各通貨ペアのレート変動が収斂するバランス地点を特定する。この基底状態におけるレートが、当該通貨ペアに関して予測される所定未来での推定価格となる。
- [0063] ———データ構造例———
続いて、本実施形態の情報提供装置100が用いる各種情報について説明する。図7に、本実施形態における価格情報125の一例を示す。
- [0064] 本実施形態の価格情報125は、各種金融商品の価格情報を蓄積したテーブルである。この価格情報としては、金融情報配信システム300が配信してきた実際の市場価格である実価格が含まれる。また、情報提供装置100がアニーリングマシンとして所定未来について算定した推定価格が含まれるとしてもよい。
- [0065] そのデータ構造は、例えば、USD／JPY、USD／EUR、NYダウ、TOPIX、などといった金融商品の名称をキーとして、対象日時、当該

対象日時における実価格、および、推定価格といったデータから成るレコードの集合体である。

[0066] なお、図7の価格情報125で例示した金融商品の例は、あくまで説明の都合上で限定的であり、その他の様々な金融商品の価格情報が格納されているものとする（以下同様）。

[0067] また、図8に本実施形態における感応度情報126の一例を示す。本実施形態の感応度情報126は、金融商品の各間における価格に関する感応度の情報を蓄積したテーブルである。この感応度の情報は、例えば、価格情報125が示す所定期間での価格の変化（方向と程度）を、金融商品の各間について相関分析することで特定される。

[0068] そのデータ構造は、USD／JPYとEUR／JPY、USD／JPYとNYダウ、USD／JPYとTOPIX、などといった感応度の対象となる金融商品の対象組をキーとして、当該組に関して得ている感応度といったデータから成るレコードの集合体である。

[0069] ــــــــــــــــフロー例1ــــــــــــــــ

以下、本実施形態における情報提供方法の実手順について図に基づき説明する。以下で説明する情報提供方法に対応する各種動作は、情報提供装置100がメモリ等に読み出して実行するプログラムによって実現される。そして、このプログラムは、以下に説明される各種の動作を行うためのコードから構成されている。

[0070] 図9は、本実施形態における情報提供方法のフロー例1を示す図である。ここでは、対象とする金融商品の一例として、図10に示す3つの通貨ペアを想定する。なお、説明を簡便とするため3つの通貨ペアを例示するが、実際にはより多くの通貨ペアや他の金融商品も対象に含めるとしてよい。

ところで、これら3つの通貨ペアのレート間には、プラスまたはマイナスの感応度が作用する関係性がある。

[0071] 例えば、USD／JPYのレートとEUR／JPYのレートとの間には、0.7の感応度がある。よってUSD／JPYのレートが1%上昇すると、

これに感応したEUR／JPYのレートは、0.7％上昇する傾向にある。

[0072] 一方、EUR／JPYのレートとUSD／EURのレートとの間には、-1.8の感応度がある。よってEUR／JPYのレートが1％上昇すると、これに感応したUSD／EURのレートは、1.8％下降する傾向にある。

[0073] ただし、こうした感応度に基づくレートの上下動は、一方の通貨ペアのレートに変化が生じたタイミングで、即座に他方の通貨ペアのレートに生じる訳では必ずしも無い。通常は、所定の時間差をもって上下動は生じる。

[0074] つまり、その「時間差」に該当する時間帯では、（感応度を踏まえると）将来到達するであろうレート（推定価格）と現在のレート（実価格）との間に乖離が存在する。

[0075] この乖離は投資機会となりうるもので、当該乖離が解消される方向（レートの上昇／下降）に応じて、当該通貨ペアの買い注文または売り注文を行えば、良好な確率で売買益を獲得できると見込まれる。よって、本実施形態の情報提供装置100は、こうした乖離（価格差）に関する情報を特定し、ユーザ端末200に提供する。

[0076] 上述のような状況を前提とした場合、情報提供装置100は、処理対象とするイジングモデル1021として、上述の各通貨ペアにおけるレートの増減事象をスピンとし、当該各通貨ペアの間におけるレートの感応度を当該スピンの間の相互作用の強度として設定したモデルの情報を保持しているものとする。

なお、通貨ペアのレートに関する情報は、価格情報125から得られる。
また、感応度に関する情報は、感応度情報126から得られる。

[0077] 図10で示す3つの通貨ペアの場合、USD／JPYとEUR／JPYのレートの間については、感応度「0.7」が当該通貨ペアのスピン間の相互作用の強度として設定される。また、EUR／JPYとUSD／EURのレートの間については、感応度「-1.8」が当該通貨ペアのスピン間の相互作用の強度として設定される。また、USD／EURとUSD／JPYのレートの間については、感応度「-0.68」が当該通貨ペアのスピン間の相

相互作用の強度として設定される。

なお、上述のイジングモデル1021におけるスピンは、1つの通貨ペアごとに1つ又は複数設定される形態を想定できる。

1つの通貨ペアごとに1つのスピンが設定された形態の場合、当該スピンはレートの増減方向のみを示しうる。

[0078] 一方、1つの通貨ペアごとに複数のスピン（以下、スピン群）が設定された形態の場合、当該スピン群はレートの増減方向および増減程度を示しうる。すなわちスピン群におけるベクトルの方向（＋方向／－方向）と大きさが、レートの増減方向と増減程度に対応する。

[0079] そこで、情報提供装置100は、アニーリングマシンとして、上述の3つの通貨ペアに関する設定がなされたイジングモデル1021を課題とし、価格情報125が示す3つの通貨ペアそれぞれの現在レート（実価格）と当該3つの通貨ペアそれぞれに関して他金融商品との感応度に基づき定まる推定レート（推定価格）との差異が最小となる基底状態を算定する（s10）。こうした基底状態の探索自体は、既存技術における処理と同様である。

[0080] つまり、各通貨ペアにおける現在レートが所定の時間経過とともに（感応度に基づく理論上の）推定レートに向け遷移し、通貨ペア全てのレートが落ち着く状態を、基底状態として探索することとなる。

[0081] ここで算定した基底状態における、3つの通貨ペアそれぞれのレートは、図10に例示するように、USD／JPYにおいて、「Bid」が「111.510」、「Ask」が「111.512」、EUR／JPYにおいて、「Bid」が「129.310」、「Ask」が「129.313」、USD／EURにおいて、「Bid」が「1.16338」、「Ask」が「1.16411」、となったとする。

[0082] これは現在から或る時間が経過した未来におけるレートである。なお、スピンの通貨ペアごとに1つ設定されたイジングモデル1021を対象とした場合、算定される基底状態では、上述の未来における通貨ペアのレート増減方向が特定される。

[0083] 続いて、情報提供装置100は、s10で得た基底状態での、3つの通貨ペアそれぞれについて、その実レートと推定レートとの間の乖離の程度を算定する(s11)。

[0084] 例えば、USD/JPYのレート変動の影響を受けたEUR/JPYにおいて、基底状態における推定レートが、「Bid」は、「129.442」、「Ask」は「129.447」、USD/EURにおいて、「Bid」は「1.16338」、「Ask」は「1.16411」、となったとする。

[0085] そこで、これら推定レートと現在のレートすなわち実レートとの除算を行って変化率を算定すれば、EUR/JPYにおいて、「Bid」は-0.1%、「Ask」は-0.1%。USD/EURにおいて、「Bid」は+0.18%、「Ask」は+0.24%、と算定できる。

[0086] こうした変化率の乖離は通貨ペア間のレートの歪みであり、投資機会となりうる。よって、情報提供装置100は、例えば乖離の大きさに従い、通貨ペア間と取引種類の情報を並び替える(s12)。また、乖離の程度が最も大きい通貨ペアとその取引種類を特定するようにしてもよい。

上述の例の場合、該当通貨ペアは「USD/EUR」、取引種類は「Ask」、と特定できる。

[0087] また、情報提供装置100は、s12で特定した通貨ペアとその取引種類、および乖離の程度の情報を、少なくとも1つ以上、ユーザ端末200に送信し(s13)、処理を終了する。

[0088] 一方、こうした情報の提供を受けたユーザ端末200では、図11に示すような、情報表示画面1100をディスプレイ等の出力部に表示させる。図11で例示するように、この情報表示画面1100では、通貨ペアおよび取引種類に加えて、当該通貨ペアにおける現在のレート、推定レート、および見込まれる値幅(乖離の程度)、の各情報も表示される。

[0089] ユーザ端末200の操作者は、この情報表示画面1100を閲覧して、好適な投資機会の到来を認識し、当該乖離が解消される方向(レートの上昇／

下降)に応じて、当該通貨ペアの買い注文または売り注文を行うこととなる。

[0090] ــــــــフロー例2ــــــــ

一方、上述のフロー例1とは異なり、いわゆる巡回セールスマン問題を通貨ペア間のレート感応に関して適用する形態も想定できる。

[0091] この場合の情報提供装置100は、感応度を有する通貨ペアの組みについて、当該組みを成す一方の通貨ペアのレート変動に感応する他方の通貨ペアのレートを推定する処理を、感応度を介してシリアルに連なる一連の通貨ペアそれぞれについて実行することになる。

[0092] 例えば、図12に示すように、USD/JPYとEUR/JPYとの間について、例えば、USD/JPYの「Bid」のレート変化率は、 $(111.442 - 110.724) / 110.724 = 0.648\%$ 、と算定できる。また、これに感応度「0.7」を乗じた、 $0.00648 \times 0.7 = 0.00453$ 、すなわち0.453%が、EUR/JPYの「Bid」のレートに生じる変化となる。そこで図13に示すように、EUR/JPYの「Bid」の推定レートとして、現在のレート「128.931」を踏まえ、 $128.931 \times (1 + 0.00453) = 129.516$ 、と推定レートを算定できる。情報提供装置100は、こうした算定を、EUR/JPYとUSD/EURとの間についても同様に実行する。

[0093] ところが、このように、USD/JPYからEUR/JPY、EUR/JPYからUSD/EUR、順序でレートの推定を行うことが最適とは限らない。また、上述の具体例のように、対象とする通貨ペアの数が限定的であれば問題無いが、対象とする通貨ペアの数や、これら通貨ペアのレートに影響を与える他の金融商品の数が膨大である場合、感応度を介して連なる全ての連なりについて処理を行うことは現実的ではない。

[0094] そこで、情報提供装置100は、種々の通貨ペアの間をどのような順序でレート推定していくのが最適か特定すべく、所定のイジングモデル1021について基底状態の探索を行うものとする。

- [0095] この場合のイジングモデル1021としては、USD／JPYとEUR／JPYといった通貨ペアの組をなす各通貨ペアにおけるレートの増減事象をスピンとし、当該組をなす通貨ペアの間における感応度を当該スピンの間の相互作用の強度として設定したモデルを想定する。
- [0096] そこで情報提供装置100は、図14のフロー例に示すように、価格情報125が示す上述の組における一方の通貨ペアの実レートと当該一方の通貨ペアに関して他方の通貨ペアとの感応度に基づき定まる推定価格との差異に関して、通貨ペア各組において最小となるイジングモデル1021における基底状態を算定する(s20)。
- [0097] つまり、感応度を有する通貨ペアの組それぞれに関して得られる推定レートと実レートとの差異(の総計)が最小となる基底状態の探索を通して、最適なルートの探索を行うものとなる。
- [0098] 情報提供装置100は、上述の一方の通貨ペアについて、実レートとs20で得た基底状態における推定レートとの差異に関する情報(図15の画面1500)を、ユーザ端末200に出力し(s21)、処理を終了する。
- [0099] なお、上述の処理形態は一例であり、例えば、様々なルートで一連の通貨ペアの間で推定レートを算定した場合の実績(当該乖離の情報に基づく実際の投資成績)に基づいて、当該ルートの良否を判定し、例えば、感応度の合計値が大きくなるルートは情報精度が高い、といった法則を生成し、これに基づいて上述の巡回セールスマン問題を解くとしてもよい。
- [0100] 以上、本発明を実施するための最良の形態などについて具体的に説明したが、本発明はこれに限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲で種々変更可能である。
- こうした本実施形態によれば、金融商品に関する情報を効率的かつ精度良好に推定可能となる。
- [0101] 本明細書の記載により、少なくとも次のことが明らかにされる。すなわち、本実施形態の情報提供装置において、前記演算部は、前記イジングモデルとして、前記スピンが複数存在し、前記金融商品の間における価格の感応度

を前記スピン各々との間の相互作用の強度として設定したモデルにおいて、前記演算を実行し、前記金融商品のうち少なくともいずれか1つの金融商品について、前記実価格と前記推定価格との差異の程度に関する情報を所定装置に出力するものである、としてもよい。

[0102] これによれば、1つのスピンで推定する価格増減の方向に加えて、価格増減の程度（実価格と基底状態における価格との差異）についても推定することが可能となる。ひいては、金融商品に関する情報を効率的かつさらに精度良好に推定可能となる。

[0103] また、本実施形態の情報提供装置において、前記演算部は、前記イジングモデルとして、前記金融商品において組をなす各金融商品における価格増減事象をスピンとし、前記組をなす金融商品の間における価格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し、前記組における一方の金融商品の実価格と当該一方の金融商品に関して他方の金融商品との感応度に基づき定まる推定価格との差異に関する情報を所定装置に出力するものである、としてもよい。

[0104] これによれば、いわゆる巡回セールスマン問題をイジングモデルとして想定する状況に適宜に対応可能となり、ひいては、金融商品に関する情報を効率的かつさらに精度良好に推定可能となる。

また、本実施形態の情報提供装置は、前記イジングモデルに関して組合せ最適化問題を解くCMOSアニーリングマシンであるとしてもよい。

[0105] これによれば、イジングモデルの動作を半導体のCMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) などの素子を用いた回路で擬似的に再現し、互いに影響しあっている金融商品価格の推定といった組合せ最適化問題の実用解を、室温下で効率良く求めることが可能となる。ひいては、金融商品に関する情報を効率的かつさらに精度良好に推定可能となる。

[0106] また、本実施形態の情報提供方法において、前記情報処理装置が、前記イジングモデルとして、前記スピンの複数存在し、前記金融商品の間における

価格の感応度を前記スピン各々との間の相互作用の強度として設定したモデルにおいて、前記演算を実行し、前記金融商品のうち少なくともいずれか1つの金融商品について、前記実価格と前記推定価格との差異の程度に関する情報を所定装置に出力する、としてもよい。

[0107] また、本実施形態の情報提供方法において、前記情報処理装置が、前記イジングモデルとして、前記金融商品において組をなす各金融商品における価格増減事象をスピンとし、前記組をなす金融商品の間における価格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し、前記組における一方の金融商品の実価格と当該一方の金融商品に関して他方の金融商品との感応度に基づき定まる推定価格との差異に関する情報を所定装置に出力する、としてもよい。

[0108] また、本実施形態の情報提供方法において、前記情報処理装置が、前記イジングモデルに関して組合せ最適化問題を解くアニーリングマシンであるとしてもよい。

符号の説明

- [0109] 10 ネットワーク
100 情報提供装置（アニーリングマシン）
101 記憶部
102 プログラム
1021 イジングモデル
103 メモリ
104 演算部
105 通信部
125 価格情報
126 感応度情報
200 ユーザ端末
300 金融情報配信システム

請求の範囲

- [請求項1] 各種金融商品の価格情報を格納した記憶部と、
 前記価格情報が示す前記金融商品それぞれの実価格と当該金融商品それぞれに関して他金融商品との感応度に基づき定まる推定価格に関し、前記金融商品における価格増減事象をスピンとし、前記金融商品の間における価格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演算部とを有し、
 前記演算部は前記演算の結果に基づき、前記金融商品のうち少なくともいずれか1つの金融商品について、将来における価格に関する情報を所定装置に出力することを特徴とする情報提供装置。
- [請求項2] 前記演算部は、
 前記イジングモデルとして、前記スピンの複数が存在し、前記金融商品の間における価格の感応度を前記スピンの各々との間の相互作用の強度として設定したイジングモデルにおいて、前記演算を実行し、前記金融商品のうち少なくともいずれか1つの金融商品について、前記実価格と前記推定価格との差異の程度に関する情報を所定装置に出力するものである、
 ことを特徴とする請求項1に記載の情報提供装置。
- [請求項3] 前記演算部は、
 前記イジングモデルとして、前記金融商品において組をなす各金融商品における価格増減事象をスピンとし、前記組をなす金融商品の間における価格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し、前記組における一方の金融商品の実価格と当該一方の金融商品に関して他方の金融商品との感応度に基づき定まる推定価格との差異に関する情報を所定装置に出力するものである、
 ことを特徴とする請求項1に記載の情報提供装置。
- [請求項4] 前記イジングモデルに関して組合せ最適化問題を解くCMOSアニ

ーリングマシンであることを特徴とする請求項1に記載の情報提供装置。

[請求項5] 各種金融商品の価格情報を格納した記憶部を備える情報処理装置が、

前記価格情報が示す前記金融商品それぞれの実価格と当該金融商品それぞれに関して他金融商品との感応度に基づき定まる推定価格に関し、前記金融商品における価格増減事象をスピンとし、前記金融商品の間における価格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し、前記演算の結果に基づき、前記金融商品のうち少なくともいずれか1つの金融商品について、将来における価格に関する情報を所定装置に出力する、

ことを特徴とする情報提供方法。

[請求項6] 前記情報処理装置が、

前記イジングモデルとして、前記スピンの複数存在し、前記金融商品の間における価格の感応度を前記スピン各々との間の相互作用の強度として設定したイジングモデルにおいて、前記演算を実行し、前記金融商品のうち少なくともいずれか1つの金融商品について、前記実価格と前記推定価格との差異の程度に関する情報を所定装置に出力する、

ことを特徴とする請求項5に記載の情報提供方法。

[請求項7] 前記情報処理装置が、

前記イジングモデルとして、前記金融商品において組をなす各金融商品における価格増減事象をスピンとし、前記組をなす金融商品の間における価格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し、前記組における一方の金融商品の実価格と当該一方の金融商品に関して他方の金融商品との感応度に基づき定まる推定価格との差異に関する情報を所定装置に出力する、

ことを特徴とする請求項5に記載の情報提供方法。

[請求項8] 前記情報処理装置が、
前記イジングモデルに関して組合せ最適化問題を解くCMOSアニーリングマシンであることを特徴とする請求項5に記載の情報提供方法。