

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4835831号  
(P4835831)

(45) 発行日 平成23年12月14日(2011.12.14)

(24) 登録日 平成23年10月7日(2011.10.7)

(51) Int.Cl. F I  
**G06F 17/10 (2006.01)** G O 6 F 17/10 Z  
**H04L 9/32 (2006.01)** H O 4 L 9/00 6 7 5 C

請求項の数 8 (全 74 頁)

(21) 出願番号	特願2005-517337 (P2005-517337)	(73) 特許権者	000004237
(86) (22) 出願日	平成17年1月26日(2005.1.26)		日本電気株式会社
(86) 国際出願番号	PCT/JP2005/001437		東京都港区芝五丁目7番1号
(87) 国際公開番号	W02005/071640	(74) 代理人	100077838
(87) 国際公開日	平成17年8月4日(2005.8.4)		弁理士 池田 憲保
審査請求日	平成19年12月12日(2007.12.12)	(74) 代理人	100082924
(31) 優先権主張番号	特願2004-16881 (P2004-16881)		弁理士 福田 修一
(32) 優先日	平成16年1月26日(2004.1.26)	(74) 代理人	100129023
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		弁理士 佐々木 敬
		(72) 発明者	古川 潤
			東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社社内
		(72) 発明者	寺西 勇
			東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 多数の入力から関数を計算する方法および装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

複数の計算装置を含む機器を用いて与えられた関数の値を計算する方法であって、  
 入力処理と、

EIGamal暗号文準備処理と、

逐次置換再暗号処理と、

結果出力処理とからなり、

前記入力処理は、

前記複数の計算装置に複数のゲートから構成された回路の情報及び前記複数の計算装置に関する情報が入力される、情報入力ステップと、関数の入力データを複数の計算装置の個数に分散したデータである複数の部分データを、それぞれの計算装置にそれぞれ一つずつ入力する分散入力ステップと、からなり、

前記EIGamal暗号文準備処理は、少なくとも一つの計算装置が、与えられた関数を実現する回路のゲートに対応したEIGamal暗号文の集合を生成するEIGamal暗号文準備ステップとからなり、

前記逐次置換再暗号処理は、

置換再暗号処理を各計算装置が順番に行う処理で、前記置換再暗号処理は、順番が回ってきた計算装置が、一つ前の順番に対応する計算装置からEIGamal暗号文の集合を受け取る暗号文取得ステップと、

前記暗号文取得ステップにて受け取った暗号文の集合を順序を入れ替えて置換し、それ

らを再暗号化する暗号文の置換と再暗号化ステップと、

前記暗号文の置換と再暗号化ステップで生成したデータを、少なくとも次の順番の計算装置に公開するステップと、からなり、

前記結果出力処理は、

前記逐次置換再暗号処理で生成された暗号文の一部を復号あるいは部分復号する部分復号ステップと、

前記逐次置換再暗号処理で生成された暗号文の中で前記回路の入力に対応するデータを暗号化している暗号文を復号する復号ステップと、

前記復号ステップで復号されたデータと、前記部分復号ステップで部分復号されたデータを用いて、回路の出力を評価する回路の評価ステップとからなり、

10

前記各ゲートに対応するElGamal暗号文の集合は、前記各計算装置が各ゲートに対応して生成した秘密鍵のElGamal暗号文の集合であり、

前記ElGamal暗号文を生成するのに用いた公開鍵は、このゲートに入力される二つの信号を生成するゲートに対応する公開鍵の和であり、

それらは、出力1に対応する暗号文と、出力0に対応する暗号文の組みが、計算する論理式に合わせて複数準備されていて、

逐次暗号化処理は、前記暗号文を再暗号化して置換する処理で、1と0に対応する暗号文がそれぞれ入れ替わる置換のみを行ない、1と1に対応する暗号文がそれぞれ入れ替わる様な置換を行なわない処理であり、

最終的な復号結果は、1と0のどちらか一方の暗号文のみ復号する処理であることを特徴とする計算方法。

20

#### 【請求項2】

複数の計算装置と、

複数の計算装置と通信する手段と、

入力処理手段と、

ElGamal暗号文準備手段と、

置換再暗号処理手段と、

結果出力処理手段と、からなる関数を評価する計算システムであって、

前記入力処理手段は、出力を求めたい回路の情報と、前記複数の計算装置に関する情報と、前記複数の計算装置がそれぞれ前記回路の入力のどの部分を所持しているかという情報と、を入力し、

30

前記ElGamal暗号文準備処理手段は、与えられた関数を実現する回路のゲートに対応したElGamal暗号文の集合を生成するElGamal暗号文を準備し、

前記置換再暗号処理手段は、

順番が回ってきた計算装置が、一つ前の順番に対応する計算装置からElGamal暗号文の集合を受け取る暗号文取得手段と、

前記暗号文取得手段により受け取られた暗号文の集合の順序を入れ替えて置換し、それらを再暗号化する暗号文の置換と再暗号化手段と、

前記暗号文の置換と再暗号化手段を用いて生成したデータを、少なくとも次の順番の計算装置に公開する手段と、からなり、

40

前記結果出力手段は、

置換再暗号処理手段で生成された暗号文の一部を復号あるいは部分復号する部分復号手段と、

前記置換再暗号処理手段で生成された暗号文の中で前記回路の入力に対応するデータを暗号化している暗号文の自分に関する暗号化を復号する復号手段と、

前記複数の計算機が前記復号手段で復号したデータと前記複数の計算機が前記部分復号手段で部分復号されたデータを用いて回路の出力を評価する回路の評価手段とからなり、

前記各ゲートに対応するElGamal暗号文の集合は、前記各計算装置が各ゲートに対応して生成した秘密鍵のElGamal暗号文の集合であり、

前記ElGamal暗号文を生成するのに用いた公開鍵は、このゲートに入力される二つの信

50

号を生成するゲートに対応する公開鍵の和であり、

それらは、出力1に対応する暗号文と、出力0に対応する暗号文の組みが、計算する論理式に合わせて複数準備されていて、

逐次暗号化処理は、前記暗号文を再暗号化して置換する処理で、1と0に対応する暗号文がそれぞれ入れ替わる置換のみを行ない、1と1に対応する暗号文がそれぞれ入れ替わる様な置換を行なわない処理であり、

最終的な復号結果は、1と0のどちらか一方の暗号文のみ復号する処理であることを特徴とする計算システム。

【請求項3】

前記請求項1に記載された計算方法において、

10

前記入力処理として、各計算装置にElGamal暗号方式の領域変数を入力するステップが行なわれ、

前記ElGamal暗号文準備処理として、各前記計算装置が、各前記回路の各ゲートに対応して、ElGamal暗号文の秘密鍵を生成するゲート秘密鍵生成ステップが行なわれ、

各計算装置では、

前記ゲート秘密鍵の生成ステップにて生成した秘密鍵に対応するゲート公開鍵を生成するゲート公開鍵の生成ステップと、

前記ゲート公開鍵の生成ステップにて生成した公開鍵の正当性の証明を生成するゲート公開鍵の正当性の証明生成ステップと、

前記ゲート公開鍵の正当性の証明生成ステップにて生成したゲート公開鍵の正当性の証明を公開するゲート公開鍵の正当性の証明公開ステップと、

20

各前記回路のゲートで回路への入力が直接入力されるゲートに対応して、ElGamal暗号文の秘密鍵を生成する入力のゲート秘密鍵の生成ステップと、

前記入力ゲート秘密鍵の生成ステップにて生成した秘密鍵に対応する入力ゲート公開鍵を生成する入力のゲート公開鍵の生成ステップと、

前記入力のゲート公開鍵の生成ステップにて生成した公開鍵の正当性の証明を生成する入力のゲート公開鍵の正当性の証明生成ステップと、

前記入力のゲート公開鍵の正当性の証明生成ステップにて生成し入力の公開鍵の正当性の証明を公開する入力のゲート公開鍵の正当性の証明公開ステップと、

その他の各計算装置が生成して公開したゲート公開鍵を取得するゲート公開鍵取得ステップと、

30

前記ゲート公開鍵取得ステップにおいて取得したゲート公開鍵を統合するゲート公開鍵の統合ステップと、

前記ゲート公開鍵の統合ステップにおいて統合したゲート公開鍵により、この計算装置が生成したゲート秘密鍵を暗号化するゲート秘密鍵の暗号化ステップと、

前記ゲート秘密鍵の暗号化ステップにおいて生成したゲート秘密鍵の暗号文を公開するゲート秘密鍵の暗号文の公開ステップと、

前記ゲート秘密鍵の暗号文の正当性証明を生成するゲート秘密鍵の暗号文の正当性の証明生成ステップと、

前記ゲート秘密鍵の暗号文の正当性の証明生成ステップにおいて生成したゲート秘密鍵の暗号文の正当性の証明を公開するゲート秘密鍵の暗号文の正当性の証明公開ステップと、

40

各計算装置に入力された回路の入力の部分に対応する暗号文を生成する入力の暗号文生成ステップと、

前記入力の暗号文生成ステップにて生成した回路の入力の部分に対応する暗号文の正当性の証明を生成する入力の暗号文の正当性の証明生成ステップと、

前記入力の暗号文の正当性の証明生成ステップにおいて生成した証明を公開する入力の暗号文の正当性の証明公開ステップと、

出力のゲートに対応する暗号文を生成して公開する出力の暗号文の生成ステップと、を含み、

50

前記置換再暗号処理が、

前記ゲート秘密鍵の暗号文の集合の順番をあらかじめ決められた許された置換の方法から無作為に一つの置換を選んで入れ替えて再暗号化するゲート秘密鍵の暗号文の置換と再暗号化ステップと、

前記入力暗号文の集合の順番をあらかじめ決められた許された置換の方法から無作為に一つの置換を選んで入れ替えて再暗号化する入力暗号文の置換と再暗号化ステップと、

前記出力暗号文の集合の順番をあらかじめ決められた許された置換方法から無作為に一つの置換を選んで入れ替えて再暗号化する出力暗号文の置換と再暗号化ステップと、

前記ゲート秘密鍵の暗号文の置換と再暗号化ステップと入力暗号文の置換と再暗号化ステップと出力暗号文の置換と再暗号化ステップとにおいてなされた置換と再暗号化の正当性の証明を生成し公開するゲート秘密鍵の暗号文と入力暗号文と出力暗号文の置換と再暗号化の正当性の証明生成と公開ステップと、を含み、

前記結果出力処理の部分復号ステップが、

前記計算装置が互いに通信及び計算することで前記ゲート秘密鍵の暗号文を部分復号するゲート秘密鍵の部分復号ステップと、

前記計算装置が互いに通信及び計算することで前記入力暗号文を部分復号する入力暗号文の部分復号ステップと、

前記計算装置が互いに通信及び計算することで前記出力暗号文を部分復号する出力暗号文の部分復号ステップと、

前記ゲート秘密鍵の部分復号ステップと入力暗号文の部分復号ステップと出力暗号文の部分復号ステップとでなされた部分復号の正当性の証明を生成し公開するゲート秘密鍵と入力暗号文と出力暗号文の部分復号ステップの正当性の証明生成と公開ステップと、を含み、

他の計算装置の公開した種々の正当性の証明を検証するステップを含む、ことを特徴とする計算方法。

#### 【請求項 4】

複数の計算装置、入力手段、出力手段を含み、まず一台の前記計算装置が計算を行い、その計算結果を他の計算装置のうち一台に送り、次にその計算結果を受け取った前記他の計算装置がその次の計算を行う、というように一台ずつ順に計算を行ってその計算結果を次の一台に回し、全ての計算装置が一度ずつ計算が終わったら、最後に計算をした計算装置が最初に計算をした前記計算装置に計算結果を送り、以後何度も、一台ずつ順に計算を行ってその計算結果を次の一台に回すという各周の計算を繰り返す計算システムであって、

前記入力手段では前記計算装置に回路の情報と、前記回路への入力ビットの一部とが入力され、

第ゼロ周目の計算は第一の計算装置が第一周目の計算を行う前に、

前記複数の計算装置には、

前記各周の計算に使用される送られてきたデータを取得するデータ取得手段と、正当性証明検証手段と、署名文検証手段と、第一の計算装置のみが行う第一計算装置特別計算手段と、乱数生成を行う乱数生成手段と、本計算を行う本計算計算手段と、本計算で行った計算の正当性を証明する正当性証明作成手段と、署名手段とデータ送信手段とからなり、

前記送られてきたデータは、別の計算装置から送られてきたデータと、データ本体と、データ本体に対する正当性証明と、署名文とからなり、

前記署名文は、前記別の計算装置から送られてきたデータと、前記データ本体と、前記データ本体に対する正当性証明との組に対する署名文であるようなデータで、

前記正当性証明検証手段は前記送られてきたデータ中の正当性証明を検証し、

前記署名検証手段は、前記送られてきたデータ中署名文を検証し、

前記本計算は前記乱数生成手段で生成された乱数を用いて計算し、

前記署名手段が、前記送られてきたデータと、前記本計算で計算された計算結果である

10

20

30

40

50

データ本体と、前記正当性証明作成手段で作成された正当性証明との組に対する署名文を作成し、

前記データ送信手段が、前記送られてきたデータと、前記本計算で計算された計算結果であるデータ本体と、前記正当性証明作成手段で作成された正当性証明と前記署名手段で作成された署名文との組を送信する事の特徴とする計算システム。

【請求項 5】

請求項 4 に記載された計算システムにおいて、

前記送られてきたデータのデータ本体と前記本計算で計算されたデータ本体とが、第一周目の計算では、共に真理値群環上の多重配列エルガマル暗号文達と真理値群環上の拡張多重配列エルガマル暗号文達とからなる組である計算システム。

10

【請求項 6】

請求項 5 に記載された計算システムにおいて、

各周の計算が、第一周目の計算手段と、第一周目以降の周の計算手段とからなり、

前記計算手段は、第ゼロ周目の計算手段では真理値群環上の多重配列エルガマル暗号文達と真理値群環上の拡張多重配列エルガマル暗号文達とからなる組を作成し、前記第一周目の計算手段が再暗号に使用する為の公開鍵を作成する再暗号用公開鍵作成手段と、送られてきたデータを変換するデータ変換手段と、秘密鍵変換手段と、乱数変換手段とからなり、

前記データ変換手段が、前記データ本体である暗号文の組を、真理値群環上の多重配列エルガマル暗号文達と真理値群環上の拡張多重配列エルガマル暗号文達とからなる別の組

20

に変換する為の手段であり、  
前記秘密鍵変換手段が、前記データ変換手段の計算結果である暗号文達の組に使用されている秘密鍵を再暗号用公開鍵作成手段で作成された公開鍵に対応する秘密鍵に変換する手段であり、

前記秘密鍵変換手段の計算結果が真理値群環上の多重配列エルガマル暗号文達と真理値群環上の拡張多重配列エルガマル暗号文達とからなる組であり、

前記乱数変換手段が前記データ変換手段の計算結果である暗号文達の組に使用されている乱数を変換する手段であり、

前記乱数変換手段の計算結果が真理値群環上の多重配列エルガマル暗号文達と真理値群環上の拡張多重配列エルガマル暗号文達とからなる組である事の特徴とする計算システム

30

【請求項 7】

請求項 6 に記載されている計算システムにおいて、

第一周目以降の周の計算手段が、第二周目の計算手段と第二周目以降の計算手段とからなり、

前記送られてきたデータのデータ本体と前記本計算で計算されたデータ本体とが、第二周目の計算では、共に真理値群環上の多重配列エルガマル暗号文達と真理値群環上の拡張多重配列エルガマル暗号文達とからなる組であり、

前記第二周目の計算手段が、

前記送られてきたデータの前記データ本体を変換してエルガマル暗号文もしくは楕円曲線エルガマル暗号文を作成する暗号変換手段と、前記送られてきたデータのデータ本体の暗号文達を部分復号する部分復号手段とからなる計算システム。

40

【請求項 8】

請求項 7 に記載されている計算システムにおいて、

第二周目以降の計算手段が、第三周目の計算手段のみからなり、第三周目の計算手段の前記本計算手段が、前記送られてきたデータをそのまま出力し、

前記正当性証明作成手段が空列を出力する計算システム。

【発明の詳細な説明】

発明の背景

本発明は、与えられた関数の入力が多数の装置に分散されて保持されている時に、これ

50

ら装置が連動してこの関数の出力を計算する方法に関し、特に各装置が他の装置と行う通信回数が与えられた関数に依らず定数回で計算できる方法およびシステムに関する。

【背景技術】

与えられた関数の入力複数の装置に分散されて保持されている時に、これら装置が連動してこの関数の出力を計算する方法の従来技術として、Beaver、Micali、Rogawayが文献「D. Beaver, S. Micali, and P. Rogaway, 『The round complexity of secure protocols』、Annual ACM Symposium on Theory of Computing 22、ページ503 - 513、1990年」にて提案した方法がある。以降この文献を非特許文献1と呼ぶ。

10

非特許文献1に開示される技術は、ネットワークで繋がる人の計算者 $u$ がそれぞれ秘密の入力 $x$ を持ち、任意の関数 $g$ が与えられたときに、計算者が互いに協力して関数の出力 $g(x_1, \dots, x_n)$ を計算する方法で、各計算者の秘密が $g(x_1, \dots, x_n)$ 以上に漏ることがなく、かつ、この計算に必要な通信回数が定数となる方法である。非特許文献1に開示される技術について図1、図2および図19を用いて説明する。

【ガードブル回路】

【記法】

回路 $f$ は $m$ 個の論理ゲートで構成されるものとし、各ゲートを $G_1, \dots, G_1, \dots, G_m$ とする。各ゲート図19に示されるように、2入力1出力で、各出力は複数のゲートに入力されても良いものとする。 $G_k$ の出力配線は一般に複数のゲートに入力されるが、配線を通る信号の値はどれも同じ値で0または1とする。また、このゲート $G_k$ から出る配線を全て $w_k$ と呼ぶ。回路 $f$ に入力される配線の本数を $n$ 個とし、これを $\{w_k\} k = m+1, \dots, m+n$ とする。 $w_1, \dots, w_1$ を回路 $f$ の出力とする。

20

計算者の人数を $\lambda$ 、計算者の集合を

$$\{u^{(\alpha)}\}_{\alpha=1, \dots, \lambda} \text{ とする。}$$

$u^{(\alpha)}$ が回路 $f$ へ入力するビットの個数を $l_\alpha$ 個とし、それらの和を $n$ とする

$$(\sum_{\alpha=1}^{\lambda} l_\alpha = n). \quad k = m+1, \dots, m+n$$

30

に関して各 $w_k$ に入力されるビットを $b_k$ とし、それぞれのビットを $u^{(\alpha)}$ に $l_\alpha$ 個ずつ次のように割り振る。すなわち、 $u^{(\alpha)}$ は集合

$$\{b_k \in \{0,1\} \mid k = m + \sum_{\beta=1}^{\alpha-1} l_\beta + 1, \dots, m + \sum_{\beta=1}^{\alpha} l_\beta\}$$

を決定する。

ゲート $G_k$ にゲート $G_i$ とゲート $G_j$ の出力が入力されたとき、 $G_j$ の出力 $b_j$ 、 $G_i$ の出力 $b_i$ 、と $G_k$ の出力 $b_k$ の間の関係を、

$$b_k = b_i \odot_{G[k]} b_j$$

40

と表す。また、 $\odot$ はbitの排他的論理和、 $\cdot$ は文字列の連結を表すとする。

$t$ は安全変数で、 $G, H, F$ は $t$ ビットの文字列を出力する疑似乱数生成器とする。

【構成】

プロトコルは大きく三つの処理、(1)入力処理402、(2)多人数計算によるガードブル回路の並列構築処理400と、(3)入力の開示と回路の計算を行う結果出力処理401とに分かれる。

入力処理402は次の様に行う。計算する回路に関する情報、他の計算者に関する情報、各装置の入力データを、各装置に入力する。

ガードブル回路の並列構築処理400は次の様に行う。この処理の過程では、図2に示

50

される、個の計算装置 501 が個別に計算を行うフェーズ 502 と、全ての計算機が互いに通信するフェーズ 503 が交互に繰り返し行われる。そして、この繰り返しの回数としてある定数回 504 が存在して、計算したい関数がどのようなものであれ以下の処理は終了できる。また、各通信フェーズでは、各計算装置がその他の全ての計算装置にデータを送信するが、この時送信するデータを生成するために、この送信と同じ通信フェーズで行われる他の計算装置の送信データを必要としてはならない。すなわち、他の計算装置のデータを待たねばできない送信があるとき、この送信を行う通信フェーズを、データを待っている通信フェーズとは別のものと数える。

[ 1 ] 計算者は協力して  $t$  ビットの文字列の集合

$$\{s_k^\alpha | s_k^\alpha \in R\{0,1\}^t\} \quad k=1, \dots, m+n; \alpha=1, \dots, \lambda$$

10

及びビットの集合

$$\{\rho_k \in R\{0,1\}\}$$

を一樣無作為に、計算者全員に秘密分散される様に生成する。ここで、

$$S_k = s_k^1 \cdot s_k^2 \cdot \dots \cdot s_k^\lambda$$

$$S'_k = s_k'^1 \cdot s_k'^2 \cdot \dots \cdot s_k'^\lambda \text{ とする。}\{S_k\}, \{\rho_k\} \text{ は } \lambda_k \square b_k = 0 \text{ であるならば、回路の計算}$$

20

フェーズにおいて  $S_k$  が公開され、 $\rho_k = 1$  ならば  $S_k$  が公開されることになる。

[ 2 ] それぞれの計算者

$u$  には、

$$\{s_k^\alpha\} \quad k=1, \dots, m+n$$

が明かされる。

[ 3 ] それぞれの計算者

$u$  は、 $k = 1, \dots, m+n$  に関して、それぞれ  $t$  ビットの文字列である

30

$$g_k^\alpha = G(s_k^\alpha)$$

$$g'_k^\alpha = G(s_k'^\alpha)$$

$$h_k^\alpha = H(s_k^\alpha)$$

$$h'_k^\alpha = H(s_k'^\alpha)$$

$$f_k^\alpha = F(s_k^\alpha)$$

$$f'_k^\alpha = F(s_k'^\alpha)$$

40

を計算し、

$$\{g_k^\alpha, g'_k^\alpha, h_k^\alpha, h'_k^\alpha, f_k^\alpha, f'_k^\alpha\}_k$$

をコミットし、さらにこれらの値を正しく計算したことを他の計算者に証明する。

[ 4 ]  $k = m+1, \dots, m+n$  に関して、計算者達は、

$$\sigma_k^1 \cdot \dots \cdot \sigma_k^\lambda = S_k \text{ もし } \lambda_k \square b_k = 0$$

$$\sigma_k^1 \cdot \dots \cdot \sigma_k^\lambda = S'_k \text{ もし } \lambda_k \square b_k = 1$$

50

を秘密に分散して計算する。

[ 5 ] 計算者達は協力して  $k = 1, \dots, m+n$  に関して、

$$\begin{aligned} A_k &= g_i^1 \square \dots \square g_i^\lambda \square g_j^1 \square \dots \square g_j^\lambda \square S_k \text{ もし } \rho_i \odot G[k] \rho_j = \rho_k \\ A_k &= g_i^1 \square \dots \square g_i^\lambda \square g_j^1 \square \dots \square g_j^\lambda \square S'_k \text{ もし } \rho_i \odot G[k] \rho_j \neq \rho_k \\ B_k &= h_i^1 \square \dots \square h_i^\lambda \square g'_j{}^1 \square \dots \square g'_j{}^\lambda \square S_k \text{ もし } \rho_i \odot G[k] \rho_j = \rho_k \\ B_k &= h_i^1 \square \dots \square h_i^\lambda \square g'_j{}^1 \square \dots \square g'_j{}^\lambda \square S'_k \text{ もし } \rho_i \odot G[k] \rho'_j \neq \rho_k \\ C_k &= g'_i{}^1 \square \dots \square g'_i{}^\lambda \square h_j^1 \square \dots \square h_j^\lambda \square S_k \text{ もし } \rho'_i \odot G[k] \rho_j = \rho_k \\ C_k &= g'_i{}^1 \square \dots \square g'_i{}^\lambda \square h_j^1 \square \dots \square h_j^\lambda \square S'_k \text{ もし } \rho'_i \odot G[k] \rho_j \neq \rho_k \\ D_k &= h'_i{}^1 \square \dots \square h'_i{}^\lambda \square g'_j{}^1 \square \dots \square g'_j{}^\lambda \square S_k \text{ もし } \rho'_i \odot G[k] \rho'_j = \rho_k \\ D_k &= h'_i{}^1 \square \dots \square h'_i{}^\lambda \square g'_j{}^1 \square \dots \square g'_j{}^\lambda \square S'_k \text{ もし } \rho'_i \odot G[k] \rho'_j \neq \rho_k \end{aligned}$$

10

を秘密に分散して計算する。但しゲート  $G_k$  に入力される信号はゲート  $G_i$  とゲート  $G_j$  の出力とする。この様子を図 19 に示す。結果出力処理 401 における入力の開示と回路の生成は次の様に行う。

20

[ 1 ] 計算者は

$$\begin{aligned} \{\rho_k\}_{k=1, \dots, l} \\ \{f_k^\alpha\}_{k=1, \dots, m+n; \alpha=1, \dots, \lambda} \\ \{\sigma_k^1 \cdot \dots \cdot \sigma_k^\lambda\}_{k=1, \dots, m+n} \\ \{A_k, B_k, C_k, D_k\}_{k=1, \dots, m+n} \end{aligned}$$

を公開する。

30

[ 2 ] 回路の入力により近い  $k$  から順番に  $k = 1, \dots, m+n$  に関して、 $S_i$  または  $S_{i'}$ 、及び  $S_j$ 、または、 $S_{j'}$  から、次のようにして  $S_k^*$  を得る。これは  $S_k$  または  $S_{k'}$  である。

$$\begin{aligned} S_k^* &= A_k \square g_i^1 \square \dots \square g_i^\lambda \square g_j^1 \square \dots \square g_j^\lambda \text{ もし } S_i, S_j \text{ を持っているなら} \\ S_k^* &= B_k \square h_i^1 \square \dots \square h_i^\lambda \square g'_j{}^1 \square \dots \square g'_j{}^\lambda \text{ もし } S_i, S'_j \text{ を持っているなら} \\ S_k^* &= C_k \square g'_i{}^1 \square \dots \square g'_i{}^\lambda \square h_j^1 \square \dots \square h_j^\lambda \text{ もし } S'_i, S_j \text{ を持っているなら} \\ S_k^* &= D_k \square h'_i{}^1 \square \dots \square h'_i{}^\lambda \square g'_j{}^1 \square \dots \square g'_j{}^\lambda \text{ もし } S'_i, S'_j \text{ を持っているなら} \end{aligned}$$

40

[ 3 ] 全ての  $i = 1, \dots, l$  ;  $k = 1, \dots, m+n$  に関して

$$\begin{aligned} f_k^\alpha &= F(s_k^\alpha), \\ f_k^\alpha &= F(s'^\alpha_k) \end{aligned}$$

を確認することで、 $S_k^* = S_k$  または  $S_k^* = S_{k'}$  を確認する。

[ 4 ] 全ての計算者は  $k = 1, \dots, l$  に関して、 $S_k$  を手にいれた場合は  $p_k + b_k = 0$ 、 $S_{k'}$  を手にいれた場合は  $p_k + b_k = 1$  が成り立つことより、 $b_k$  を求める。

技術分野の欄に記述された様な方法のその他の従来技術として、Ishai、Kus

50

hilevitzは、文献「Y. Ishai and E. Kushilevitz、『Randomizing Polynomials: A new Representation with Applications to Round-Efficient Secure Computation』、IEEE Symposium on Foundations of Computer Science 2000、ページ294-304」にて提案した方法がある。以降この文献を非特許文献2と呼ぶ。非特許文献2の従来技術を図3および図4を用いて説明する。

【ランダム化多項式】

非特許文献2には、与えられた関数のある有限体上の低い次数の多項式で表現する方法が提案されている。特に任意の関数が次数3の多項式で表現可能であることが示されている。次数が低い多項式を評価することは定数回のラウンドで可能である。一般に関数は、回路等様々な形で表現することができる。

10

次にあげるブランディング問題も一般の関数を表現することができる。ブランディング問題  $BP = (G, \text{ラベル付け関数}, s, t)$  を  $\text{mod}-p$  ブランディング問題と呼ぶ。 $G = (V, E)$  は向き付けられたグラフ、ラベル付け関数はラベル付け関数で、 $G$ のそれぞれの辺に、 $1, x^1_i$ 、あるいはその否定  $x^0_i$  のいずれかを関係付けるもの、 $s, t$  は特別な頂点である。

入力  $x = (x_1, \dots, x_n)$  が与えられたとき、ラベル付け関数により  $G$  の部分グラフ  $G_x$  が与えられる。 $BP$  で計算される  $\text{boolean}$  関数  $f$  の値は、 $G_x$  における  $s-t$  を結ぶ経路の数を  $p$  で割った余りが0ならば  $f(x) = 0$ 、そうでなければ  $f(x) = 1$  とする。 $BP$  の大きさを  $G$  の頂点の数とする。

20

$BP$  の大きさを  $l$  とする。部分グラフ  $G_x$  の  $| \text{times} |$  隣接行列を  $H_x$  とすると、 $s-t$  間を結ぶ経路の数は、

$$\begin{aligned} (l + H_x + H_x^2 + \dots + s)_{st} &= ((1 - H_x)^{-1})_{st} \text{ mod } p \\ &= \det M_x / \det (I - H_x) \text{ mod } p \end{aligned}$$

となる。ここで  $M_x$  は行列  $(I - H_x)$  から  $s$  行と  $t$  列を除いた行列とする。よって、

$$f(x) = 0 \Leftrightarrow \text{rank}(M_x) = l - 1$$

$$f(x) = 1 \Leftrightarrow \text{rank}(M_x) = l$$

30

となる。また、 $M_x$  は  $x$  に関して高々1次の成分からなる。

【計算方法】

ブール関数  $f$  が与えられ、その入力  $x$  が複数の計算者に分配されている時に、ランダム化多項式の方法を用いて  $f(x)$  を求める方法を記す。

【0079】

図3に示すように、

[1] 計算する関数に関する情報、他の計算者に関する情報、各装置の入力データを、各装置に入力する(605)。

[2]  $f$  に対応する  $BP$  を構成する(600)。

40

[3] 次の処理を十分な回数並列して行う(601)。

【処理】

図4に示すように、

全ての計算者は各成分を分散して  $|x|$  行列  $R_1, R_2$  を一様無作為に生成し(603)、3行列  $R_1, M_x, R_2$  の積である  $R_1 M_x R_2$  を計算する(604)。

各成分は  $R_1, R_2, x$  の要素の高々3次の式であり、その計算に必要なラウンド数は高々定数回である。

[4] 全ての  $\text{rank}(R_1 M_x R_2)$  の値から  $M_x$  の  $\text{rank}$  が  $l$  であるかを推測し、 $l$  である確率が高ければ1を、でなければ0を出力する(602)。

上記方法において、 $\text{rank}(M_x) = \text{rank}(R_1 M_x R_2)$  であれば、 $R_1 M_x R_2$  と

50

$R_1 M \times R_2$  の分布は同じになるので、 $x$  に関する情報は  $f(x)$  以外は新たに漏ることはない。

さらに、いかなる  $l$  に対しても、 $\text{rank}(M \times) = l$  であるならば  $\text{rank}(R_1 M \times R_2) = l$  となる確率は  $0.08$  より大きいので、項目 2 の処理を実行する回数は  $l$  に依存しない。

【計算量と通信量】

ガープルド回路を用いた方法では、各ゲートに関する計算は独立して行われ、全体の通信量と計算量はゲートの数に比例する。 $t - n$  閾値分散 ( $2t^2$  に比例する。 $t - n$  閾値分散での計算とは  $n$  人で秘密を分散して計算を行うが、このうち  $t$  人が各自知っているデータを持ち寄らない限り、分散された秘密や計算の途中の意味のあるデータを知ることができない計算方法である。

10

ランダムマイジング多項式を用いた方法では、 $t - n$  閾値分散が行われた場合で、 $t^2$  と  $BP$  の大きさの 2 乗に比例し、ラウンド数は  $2(3)$  となる。

ランダムマイジング多項式の方法では通信量と計算量はゲート数の高々 1 次に比例する。さらに、最高次の係数はランダムマイジング多項式の方法のものが断然低く、効率的である。

しかし、ここでは  $t - n$  閾値分散で  $t > n/2$  である様な場合で第三者が計算の正当性を検証できることを要求する場合に特に注目する。この様な場合に前述の方法を拡張することは容自明である。拡張の結果は、ガープルド回路を用いた方法で全体の通信量と計算量はゲートの数と  $t^3$  に比例し、ランダムマイジング多項式の方法を用いた場合、通信量と計算量がゲート数の  $1.5$  乗に比例し、ゲート数が大きい場合効率的ではない。

20

第 1 の問題点は、非特許文献 1 の方法は、各計算者の計算量及び計算の正当性を検証する検証者の計算量が膨大になるということである。

その理由は、各計算者は疑似乱数生成装置の出力を計算しなければならないが、この計算を正しく行ったことを計算結果を隠したまま証明する必要があるためである。

第 2 の問題点は、非特許文献 2 の方法も、やはり各計算者の計算量及び計算の正当性を検証する検証者の計算量が膨大になるということである。

その理由は、各計算者が計算する計算量が、関数を回路で表現した場合のゲート数の  $1.5$  乗に比例し、かつ多くの場合ゲート数は非常に多いため、全体の計算量が膨大になるということである。

30

【発明の開示】

本発明の目的は、回路を表現するゲート数が多くなってもその計算装置がゲート数に比例するに留め、計算装置がその計算の正当性を証明すべき疑似乱数生成装置の出力を計算する必要がなく、かつ計算装置の通信回数に関数に依らずに定数回となる計算方法およびシステムを提供することにある。

本発明の計算方法は、複数の計算装置を含む機器を用いて与えられた関数の値を計算する方法であって、

入力処理と、

出力処理とからなり、

前記入力処理では、前記複数の計算装置に、回路と、前記回路への入力ビットとが入力され、

40

まず一台の前記計算装置が計算を行い、その計算結果を他の前記計算装置のうち一台に送り、次にその計算結果を受け取った前記前記計算装置がその次の計算を行う、というように一台ずつ順に計算を行ってその計算結果を次の一台に回し、全ての前記計算装置が一度ずつ計算が終わったら、最後に計算をした計算装置が最初に計算をした計算装置に計算結果を送り、以後何度も、一台ずつ順に計算を行ってその計算結果を次の一台に回すという各周の計算を繰り返す事の特徴とする。

本発明の他の形態による計算方法は、複数の計算装置を含む機器を用いて与えられた関数の値を計算する方法であって、

入力処理と、

50

E 1 G a m a 1 暗号文準備処理と、  
 逐次置換再暗号処理と、  
 結果出力処理とからなり、  
 前記入力処理は、

前記複数の計算装置に複数のゲートから構成された回路の情報及び前記複数の計算装置に関する情報が入力される、情報入力ステップと、関数の入力データを複数の計算装置の個数に分散したデータである複数の部分データを、それぞれの計算装置にそれぞれ一つずつ入力する分散入力ステップと、からなり、

前記 E 1 G a m a 1 暗号文準備処理は、少なくとも一つの計算装置が、与えられた関数を実現する回路のゲートに対応した E 1 G a m a 1 暗号文の集合を生成する E 1 G a m a 1 暗号文準備ステップとからなり、

10

前記逐次置換再暗号処理は、

置換再暗号処理を各計算装置が順番に行う処理で、前記置換再暗号処理は、順番が回ってきた計算装置が、一つ前の順番に対応する計算装置から E 1 G a m a 1 暗号文の集合を受け取る暗号文取得ステップと、

前記暗号文取得ステップにて受け取った暗号文の集合を順序を入れ替えて置換し、それらを再暗号化する暗号文の置換と再暗号化ステップと、

前記暗号文の置換と再暗号化ステップで生成したデータを、少なくとも次の順番の計算装置に公開するステップと、からなり、

前記結果出力処理は、

20

前記逐次置換再暗号処理で生成された暗号文の一部を復号あるいは部分復号する部分復号ステップと、

前記前記逐次置換再暗号処理で生成された暗号文の中で前記回路の入力に対応するデータを暗号化している暗号文を復号する復号ステップと、

前記復号ステップで復号されたデータと、前記部分復号ステップで部分復号されたデータを用いて、回路の出力を評価する回路の評価ステップと、からなることを特徴とする。

この場合、前記各ゲートに対応する E 1 G a m a 1 暗号文の集合は、前記各計算装置が各ゲートに対応して生成した秘密鍵の E 1 G a m a 1 暗号文の集合であり、

前記 E 1 G a m a 1 暗号文を生成するのに用いた公開鍵は、このゲートに入力される二つの信号を生成するゲートに対応する公開鍵の和であることとしてもよい。

30

また、前記入力処理として、各計算装置に E 1 G a m a 1 暗号方式の領域変数を入力するステップが行なわれ、

前記 E 1 G a m a 1 暗号文準備処理として、各前記計算装置が、各前記回路の各ゲートに対応して、E 1 G a m a 1 暗号文の秘密鍵を生成するゲート秘密鍵生成ステップが行なわれ、

各計算装置では、

前記ゲート秘密鍵の生成ステップにて生成した秘密鍵に対応するゲート公開鍵を生成するゲート公開鍵の生成ステップと、

前記ゲート公開鍵の生成ステップにて生成した公開鍵の正当性の証明を生成するゲート公開鍵の正当性の証明生成ステップと、

40

前記ゲート公開鍵の正当性の証明生成ステップにて生成したゲート公開鍵の正当性の証明を公開するゲート公開鍵の正当性の証明公開ステップと、

各前記回路のゲートで回路への入力が入力されるゲートに対応して、E 1 G a m a 1 暗号文の秘密鍵を生成する入力のゲート秘密鍵の生成ステップと、

前記入力ゲート秘密鍵の生成ステップにて生成した秘密鍵に対応する入力ゲート公開鍵を生成する入力のゲート公開鍵の生成ステップと、

前記入力のゲート公開鍵の生成ステップにて生成した公開鍵の正当性の証明を生成する入力のゲート公開鍵の正当性の証明生成ステップと、

前記入力のゲート公開鍵の正当性の証明生成ステップにて生成し入力の公開鍵の正当性の証明を公開する入力のゲート公開鍵の正当性の証明公開ステップと、

50

その他の各計算装置が生成して公開したゲート公開鍵を取得するゲート公開鍵取得ステップと、

前記ゲート公開鍵取得ステップにおいて取得したゲート公開鍵を統合するゲート公開鍵の統合ステップと、

前記ゲート公開鍵の統合ステップにおいて統合したゲート公開鍵により、この計算装置が生成したゲート秘密鍵を暗号化するゲート秘密鍵の暗号化ステップと、

前記ゲート秘密鍵の暗号化ステップにおいて生成したゲート秘密鍵の暗号文を公開するゲート秘密鍵の暗号文の公開ステップと、

前記ゲート秘密鍵の暗号文の正当性証明を生成するゲート秘密鍵の暗号文の正当性の証明生成ステップと、

10

前記ゲート秘密鍵の暗号文の正当性の証明生成ステップにおいて生成したゲート秘密鍵の暗号文の正当性の証明を公開するゲート秘密鍵の暗号文の正当性の証明公開ステップと、

各計算装置に入力された回路の入力の部分に対応する暗号文を生成する入力暗号文生成ステップと、

前記入力暗号文生成ステップにて生成した回路の入力の部分に対応する暗号文の正当性の証明を生成する入力暗号文の正当性の証明生成ステップと、

前記入力暗号文の正当性の証明生成ステップにおいて生成した証明を公開する入力暗号文の正当性の証明公開ステップと、

出力のゲートに対応する暗号文を生成して公開する出力暗号文の生成ステップと、を含み、

20

前記置換再暗号処理が、

前記ゲート秘密鍵の暗号文の集合の順番をあらかじめ決められた許された置換の方法から無作為に一つの置換を選んで入れ替えて再暗号化するゲート秘密鍵の暗号文の置換と再暗号化ステップと、

前記入力暗号文の集合の順番をあらかじめ決められた許された置換の方法から無作為に一つの置換を選んで入れ替えて再暗号化する入力暗号文の置換と再暗号化ステップと、

前記出力暗号文の集合の順番をあらかじめ決められた許された置換方法から無作為に一つの置換を選んで入れ替えて再暗号化する出力暗号文の置換と再暗号化ステップと、

30

前記ゲート秘密鍵の暗号文の置換と再暗号化ステップと入力暗号文の置換と再暗号化ステップと出力暗号文の置換と再暗号化ステップとにおいてなされた置換と再暗号化の正当性の証明を生成し公開するゲート秘密鍵の暗号文と入力暗号文と出力暗号文の置換と再暗号化の正当性の証明生成と公開ステップと、を含み、

前記結果出力処理の部分復号ステップが、

前記計算装置が互いに通信及び計算することで前記ゲート秘密鍵の暗号文を部分復号するゲート秘密鍵の部分復号ステップと、

前記計算装置が互いに通信及び計算することで前記入力暗号文を部分復号する入力暗号文の部分復号ステップと、

前記計算装置が互いに通信及び計算することで前記出力暗号文を部分復号する出力暗号文の部分復号ステップと、

40

前記ゲート秘密鍵の部分復号ステップと入力暗号文の部分復号ステップと出力暗号文の部分復号ステップとでなされた部分復号の正当性の証明を生成し公開するゲート秘密鍵と入力暗号文と出力暗号文の部分復号ステップの正当性の証明生成と公開ステップと、を含み、

他の計算装置の公開した種々の正当性の証明を検証するステップを含む、こととしてもよい。

本発明の計算システムは、複数の計算装置と、

複数の計算装置と通信する手段と、

入力処理手段と、

50

E l G a m a l 暗号文準備手段と、  
 置換再暗号処理手段と、  
 結果出力処理手段と、からなる関数を評価する計算システムであって、  
 前記入力処理手段は、出力を求めたい回路の情報と、前記複数の計算装置に関する情報  
 と、前記複数の計算装置がそれぞれ前記回路の入力のどの部分を所持しているかという情  
 報と、を入力し、  
 前記 E l G a m a l 暗号文準備処理手段は、与えられた関数を実現する回路のゲートに  
 対応した E l G a m a l 暗号文の集合を生成する E l G a m a l 暗号文を準備し、  
 前記置換再暗号処理手段は、  
 順番が回ってきた計算装置が、一つ前の順番に対応する計算装置から E l G a m a l 暗  
 号文の集合を受け取る暗号文取得手段と、 10  
 前記暗号文取得手段により受け取られた暗号文の集合の順序を入れ替えて置換し、それ  
 らを再暗号化する暗号文の置換と再暗号化手段と、  
 前記暗号文の置換と再暗号化手段を用いて生成したデータを、少なくとも次の順番の計  
 算装置に公開する手段と、からなり、  
 前記結果出力手段は、  
 置換再暗号処理手段で生成された暗号文の一部を復号あるいは部分復号する部分復号手  
 段と、  
 前記前記逐次置換再暗号処理で生成された暗号文の中で前記回路の入力に対応するデー  
 タを暗号化している暗号文の自分に関する暗号化を復号する復号手段と、 20  
 前記複数の計算機が前記復号手段で復号したデータと前記複数の計算機が前記部分復号  
 手段で部分復号されたデータを用いて回路の出力を評価する回路の評価手段と、からなる  
 ことを特徴とする。  
 本発明の他の形態による計算システムは、複数の計算装置、入力手段、出力手段を含み  
 、まず一台の前記計算装置が計算を行い、その計算結果を他の前記計算装置のうち一台に  
 送り、次にその計算結果を受け取った前記前記計算装置がその次の計算を行う、という  
 ように一台ずつ順に計算を行ってその計算結果を次の一台に回し、全ての前記計算装置が  
 一度ずつ計算が終わったら、最後に計算をした計算装置が最初に計算をした計算装置に計  
 算結果を送り、以後何度も、一台ずつ順に計算を行ってその計算結果を次の一台に回す  
 という各周の計算を繰り返す計算システムであって、 30  
 前記入力手段では前記計算装置に回路の情報と、前記回路への入力ビットの一部とが入  
 力され、  
 第ゼロ周目の計算は第一の計算装置が第一周目の計算を行う前に行い、  
 前記複数の計算装置には、  
 前記各周の計算に使用される送られてきたデータを取得するデータ取得手段と、正当性  
 証明検証手段と、署名文検証手段と、第一の計算装置のみが行う第一計算装置特別計算手  
 段と、乱数生成を行う乱数生成手段と、本計算を行う本計算計算手段と、本計算で行った  
 計算の正当性を証明する正当性証明作成手段と、署名手段とデータ送信手段とからなり、  
 前記送られてきたデータは、別の計算装置から送られてきたデータと、データ本体と、  
 データ本体に対する正当性証明と、署名文とからなり、 40  
 前記署名文は、前記別の計算装置から送られてきたデータと、前記データ本体と、前記  
 データ本体に対する正当性証明との組に対する署名文であるようなデータで、  
 前記正当性証明検証手段は前記送られてきたデータ中の正当性証明を検証し、  
 前記署名検証手段は、前記送られてきたデータ中署名文を検証し、  
 前記本計算は前記乱数生成手段で生成された乱数を用いて計算し、  
 前記署名手段が、前記送られてきたデータと、前記本計算で計算された計算結果である  
 データ本体と、前記正当性証明作成手段で作成された正当性証明との組に対する署名文を  
 作成し、  
 前記データ送信手段が、前記送られてきたデータと、前記本計算で計算された計算結果  
 であるデータ本体と、前記正当性証明作成手段で作成された正当性証明と前記署名手段で 50

作成された署名文との組を送信する事の特徴とする。

この場合、前記送られてきたデータのデータ本体と前記本計算で計算されたデータ本体とが、第一周目の計算では、共に真理値群環上の多重配列エルガマル暗号文達と真理値群環上の拡張多重配列エルガマル暗号文達とからなる組であるとしてもよい。

また、各週の計算が、第一周目の計算手段と、第一周目以降の週の計算手段とからなり、

前記計算手段は、第ゼロ周目の計算手段では真理値群環上の多重配列エルガマル暗号文達と真理値群環上の拡張多重配列エルガマル暗号文達とからなる組を作成し、前記第一周目の計算手段が再暗号に使用する為の公開鍵を作成する再暗号用公開鍵作成手段と、送られてきたデータを変換するデータ変換手段と、秘密鍵変換手段と、乱数変換手段とからなり、

10

前記データ変換手段が、前記データ本体である暗号文の組を、真理値群環上の多重配列エルガマル暗号文達と真理値群環上の拡張多重配列エルガマル暗号文達とからなる別の組に変換する為の手段であり、

前記秘密鍵変換手段が、前記データ変換手段の計算結果である暗号文達の組に使用されている秘密鍵を再暗号用公開鍵作成手段で作成された公開鍵に対応する秘密鍵に変換する手段であり、

前記秘密鍵変換手段の計算結果が真理値群環上の多重配列エルガマル暗号文達と真理値群環上の拡張多重配列エルガマル暗号文達とからなる組であり、

前記乱数変換手段が前記データ変換手段の計算結果である暗号文達の組に使用されている乱数を変換する手段であり、

20

前記乱数変換手段の計算結果が真理値群環上の多重配列エルガマル暗号文達と真理値群環上の拡張多重配列エルガマル暗号文達とからなる組であるとしてもよい。

また、第一周目以降の週の計算手段が、第二周目の計算手段と第二周目以降の計算手段とからなり、

前記送られてきたデータのデータ本体と前記本計算で計算されたデータ本体とが、第二周目の計算では、共に真理値群環上の多重配列エルガマル暗号文達と真理値群環上の拡張多重配列エルガマル暗号文達とからなる組であり、

前記第二周目の計算手段が、

前記送られてきたデータの前記データ本体を変換してエルガマル暗号文もしくは楕円曲線エルガマル暗号文を作成する暗号変換手段と、前記送られてきたデータのデータ本体の暗号文達を部分復号する部分復号手段とからなるとしてもよい。

30

さらに、第二周目以降の計算手段が、第三周目の計算手段のみからなり、第三周目の計算手段の前記本計算手段が、前記送られてきたデータをそのまま出力し、

前記正当性証明作成手段が空列を出力するとしてもよい。

本発明の多数の入力から関数を計算する方法は、E l G a m a l暗号方式を利用して、その値を隠したゲートの入出力の対応表を生成する手段とを備え、各入力を持った装置が次々と順番に、図5に示すようにE l G a m a l暗号文の集合からなる対応表の順番を入れ替えるよう動作する。このような構成を採用し、各装置に分配された入力に対する関数の出力を計算することにより本発明の目的を達成することができる。

40

#### 【発明の効果】

第1の効果は、各計算装置の計算量と通信量が回路のゲート数に比例するに留まり、効率的であることにある。

その理由は、各ゲート毎にゲートの入出力の対応表をE l G a m a l暗号文で生成し、疑似乱数生成装置を用いなかったため、この対応表の計算の正当性を第三者に証明するのが容易になったためである。

第2の効果は、各計算装置の他の計算装置との通信回数が、計算する回路のゲート数に依らず定数回に留まり、効率的であることにある。

その理由は、各ゲートの入出力の対応表の対応関係がいずれの計算装置にも分からなくなる操作が必要であるが、この操作が各計算装置が順番に対応関係を入れ替える操作を行

50

えば実現されるからである。

【図面の簡単な説明】

図 1 は非特許文献 1 の従来の技術を説明したフローチャートである。

図 2 は非特許文献 1 の従来の技術における、ガープルド回路並列構築処理における、計算フェーズと通信フェーズの関係を示した図である。同じ番号が振られた計算装置が複数回記述されているが、これらは同一のもので、動作する時間が異なっているだけである。本図において、時は上から下へ流れるよう記述されている。

図 3 は非特許文献 2 の従来の技術を説明したフローチャートである。

図 4 は非特許文献 2 の従来の技術を説明したフローチャート「図(3)」における並列したランク判定処理の中で、並列して複数回行われる処理を一つだけ取り出して記述したフローチャートである。

10

図 5 は本明細書提案の技術が従来方法の問題を解決するために考案した計算処理の流れを示すブロック図である。

図 6 は第 1 の発明を実施するための最良の形態の動作の具体例を示すフローチャートである。

図 7 は第 1 の発明を実施するための最良の形態の動作の具体例における、E1Gamma1 暗号文準備処理の詳細を示すフローチャートの前半である。

図 8 は第 1 の発明を実施するための最良の形態の動作の具体例における、E1Gamma1 暗号文準備処理の詳細を示すフローチャートの後半である。

図 9 は第 1 の発明を実施するための最良の形態の動作の具体例における、逐次置換再暗号処理の詳細を示すフローチャートの前半である。右の吹き出しの中に示されたフローチャートの処理を、各計算装置が順番に行う。

20

図 10 は第 1 の発明を実施するための最良の形態の動作の具体例における、結果出力処理の詳細を示すフローチャートである。

図 11 は第 1 の発明を実施するための最良の形態の構成を示すブロック図である。

図 12 は第 1 の発明を実施するための最良の形態の構成を構成する計算装置の構成を示すブロック図である。

図 13 は第 1 の発明を実施するための最良の形態の動作の具体例における、入力処理の詳細を示すフローチャートである。

図 14 は第二の発明の装置の関係を示したブロック図、

30

図 15 は第二の発明で、各計算装置が一周目から三周目までの各周で行う計算のフローチャート、

図 16 は第二の発明におけるデータの流れ、

図 17 は一周目の本計算のフローチャート、

図 18 は二周目の本計算のフローチャート、

図 19 は従来の技術における各ゲートに関して計算されるデータの理解を助けるための図である。

【発明を実施するための最良の形態】

次に、本発明の実施例について図面を参照して説明する。

【実施例 1】

40

本発明の第 1 の実施例について、図 6 ないし図 13 を用いて説明する。

[準備]

[システム構成]

図 11 に示すように、計算装置 308 が 個あり、それぞれ通信手段 307 を備えている。以下ではこの計算機を順番に、

$$\{u^{(\alpha)}\}_{\alpha=1,\dots,\lambda}$$

と呼ぶことにする。計算装置数、各計算装置と対応する添字 との関係等をシステムの構成情報と呼ぶ。

50

[ 回路の情報 ]

後の説明で、回路の情報が各計算装置

$$\{u^{(\alpha)}\}_{\alpha=1,\dots,\lambda}$$

に入力されるが、この回路の情報を説明する。

まず、入力される回路の情報が表現する回路を  $f$  と呼ぶことにする。  $f$  は  $m$  個の論理ゲートで構成されている回路とする。各ゲートを  $G_1, \dots, G_1, \dots, G_m$  と呼ぶ。ここでは各ゲートは 2 入力 1 出力であるとする。この様なゲートで回路が構成されていなかった場合は、各ゲートを複数の 2 入力 1 出力のゲートからなる等価な回路に置き換える。この置き換え方法は明らかなので省略する。また回路のあるゲートから他のゲートの入力へ信号を送る配線は、0 または 1 に対応する信号を送るとする。  $G$  「  $k$  」 の出力配線を  $w_{[k]}$  とする。  $f$  に入力される配線の本数を  $n$  個とし、これを  $\{w_{[k]}\}_{k=m+1, \dots, m+n}$  とする。配線は途中で分岐して二つ以上のゲートに入力していても良い。配線  $[k]$  は分岐しても同じ信号を送信するものとし、この分岐した配線をまとめて  $w_{[k]}$  と呼ぶ。  $w_{[1]}, \dots, w_{[1]}$  を回路  $f$  の出力とする。回路の配線は全て、ゲートの出力配線か回路への入力配線のいずれかであるので、配線全て  $\{w_{[k]}\}_{k=1, \dots, m+n}$  が配線の全てである。

10

ゲート  $G_k$  にゲート  $G_i$  とゲート  $G_j$  の出力が入力されたとき、すなわち、配線  $w_{[i]}$  と配線  $w_{[j]}$  がゲート  $G_k$  に入力され、配線  $w_k$  が  $G_k$  の出力のための配線として繋がっているときに、  $G_i$  の出力  $b$  「  $i$  」、  $G_j$  の出力  $b$  「  $j$  」、と  $G_k$  の出力  $b$  「  $k$  」 の間の関係を、  $b$  「  $k$  」 =  $b$  「  $i$  」  $G$  「  $k$  」  $b$  「  $j$  」 とし、各計算装置  $u^{(\ )}$  は、  $f$  に入力する信号の一部を持っているものとする。すなわち、配線  $\{w_{[k]}\}_{k=m+1, \dots, m+n}$  のうちの一部に伝搬させる信号を知っているとす。

20

$u^{(\ )}$  が  $f$  へ入力するビットの個数を  $l$  個とし、全ての計算装置の持つ入力を集めると、回路への入力全てとなるとする。すなわち、

$$\sum_{\alpha=1}^{\lambda} l_{\alpha} = \lambda$$

となる。  $k = m + 1, \dots, m + n$  に関して各  $w_{[k]}$  に入力されるビットを  $b$  「  $k$  」 とし、それぞれのビットを  $u^{(\ )}$  に  $l$  個ずつ次のように割り振る。すなわち、  $u^{(\ )}$  は集合

30

$$\{b_{[k]} \in \{0,1\}\}_{k=m+\sum_{\beta=1}^{\alpha-1} l_{\beta}+1, \dots, m+\sum_{\beta=1}^{\alpha} l_{\beta}}$$

を決定する。ゲートの番号の割り振りを変更しても回路は本質的に変わらないため、上記のように入力を割り振っても一般性は損なわれない。

上記  $m$  個のゲート  $G_1, \dots, G_m$ 、それぞれのゲートの行う演算  $G_{[k]}$ 、それぞれのゲートに繋がる配線  $\{w_{[k]}\}_{k=m+1, \dots, m+n}$ 、入力配線の計算装置に対する割り振り  $\{l_{\alpha}\}_{\alpha=1, \dots, \lambda}$  を回路の情報 300 と呼ぶ。

40

[ 演算に用いる群 ]

本実施例では、楕円曲線上での演算を利用するのでこれを説明する。しかし、これは本発明を実施するためにはこれは必ずしも必須ではない。これに代替となるものとして、素体上の演算等、可換な乗法群であれば良い。

以降、  $E$  を位数が素数  $q$  である楕円曲線、  $O$  を  $E$  の無限遠点、  $G(O)$  を  $E$  上の点とする。  $q$  は、暗号学的に安全とされるに十分な大きさであるとする。楕円曲線  $E$  上の点から  $Z/qZ$  上への写像を  $\phi$  とする。  $\phi$  は、その像の空間が十分に大きいものを選ぶ。  $\phi$  の例として、楕円曲線  $E$  上の点の座標の片方の値を使う等がある。  $h$  を  $Z/qZ$  の要素、  $G$  を楕円曲線上の点としたとき、  $G$  の  $h$  倍点を  $[h]G$  と表す。

[ 記法 ]

50

文字の右肩に記された文字は上付きの添字であって、冪乗を表す指数ではない。また、は  $b_i t$  の排他的論理和を表すとする。

[ 入力処理 203 , 312 ]

処理が開始されると、図 6 に示されるように、まず、入力処理 203 が行なわれる。この入力処理 203 について、処理を詳細に示す図 12 および図 13 を参照して説明する。

E1Gamal 暗号文準備処理では情報公開手段と公開情報取得手段を使って、データの公開と取得の両方を行う (309)。

[ 領域変数の決定 ]

計算は  $E$  ,  $G$  及び  $H$  を決定する。また、ハッシュ関数を利用する等の方法で、誰もが  $H = [h]G$  なる  $Z/qZ$  の元  $h$  が分からない様な楕円曲線上の点  $H$  を決定する。これらの値  $E$  ,  $G$  ,  $H$  ,  $u$  を領域変数 301 と呼ぶ。これらはあらかじめ全ての計算装置に格納しておく (図 13 の 100)。

[ 回路の情報及び、回路の部分入力の入力 ]

回路  $f$  の情報及びシステムの構成情報が全ての計算装置に入力される (図 13 の 101)。

各計算装置  $\{u^{(\alpha)}\}_{\alpha=1,\dots,\lambda}$  それぞれに、回路への分散された部分入力

$$\{b_{\Gamma k}\} \in \{0,1\} \quad k = m + \sum_{\beta=1}^{\alpha-1} l_{\beta} + 1, \dots, m + \sum_{\beta=1}^{\alpha} l_{\beta}$$

を入力する (図 13 の 102)。

[ E1Gamal 暗号文準備処理 200 , 303 ]

[ ゲート毎の秘密鍵と公開鍵設定 ]

次に、図 6 に示されるように、E1Gamal 暗号文準備処理 200 が行なわれる。この E1Gamal 暗号文準備処理 200 について、処理を詳細に示す図 7 および図 8 を参照して説明する。

各計算装置  $u^{(\alpha)}$  は、全ての  $k = 1, \dots, m+n$ 、全ての  $b_{\Gamma k} \in \{0,1\}$  に関して、ゲート秘密鍵

$$X^{(\alpha)b_{\Gamma k}} \in R_E$$

$$z^{(\alpha)} \in R_{Z/qZ}$$

を一樣無作為に生成し (図 7 の 103)、全ての  $k = 1, \dots, m+n$ 、全ての  $b_{\Gamma k} \in \{0,1\}$  に関して、

$$x^{(\alpha)b_{\Gamma k}} = \Phi(X^{(\alpha)b_{\Gamma k}})$$

を生成し、全ての  $k = 1, \dots, m+n$ 、全ての  $b_{\Gamma k} \in \{0,1\}$  に関して、ゲート公開鍵

$$Y^{(\alpha)b_{\Gamma k}} = [x^{(\alpha)b_{\Gamma k}}]G$$

$$Z^{(\alpha)} = [z^{(\alpha)}]G$$

を生成し (図 7 の 104)、各計算装置  $u^{(\alpha)}$  は各自の生成したゲート公開鍵をそれぞれ、情報公開装置を用いて公開する (図 7 における 105)。以降本実施例 1 では公開するとは、情報公開装置を用いて公開することである。

併せて計算装置  $u^{(\alpha)}$  は、各  $Y^{(\alpha)b_{\Gamma k}}$  ,  $Z^{(\alpha)}$  に関して  $x^{(\alpha)b_{\Gamma k}}$  ,  $z^{(\alpha)}$  の知識の証明を、別記述 A の方法に従って、ゲート公開鍵の正当性証明として生成 (図 7 における 106) し、公開 (図 7 の 107) する。

[ 入力の公開鍵設定 ]

各計算装置  $u_{(k)}$  は、全ての

$$k = m + 1 + \sum_{\beta=1}^{\alpha-1} |_{\beta}, \dots, m + \sum_{\beta=1}^{\alpha} |_{\beta}$$

に関して、入力された  $b_{(k)} \in \{0, 1\}$  を用いて入力ゲートの秘密鍵

$$x_{(k)}^{b_{(k)}} \in \mathbb{R}Z/qZ$$

を一様無作為に生成し (図7の108)、入力ゲートの公開鍵

$$Y_{(k)}^{b_{(k)}} = [x_{(k)}^{b_{(k)}}]G$$

10

$$Y_{(k)}^{b_{(k)}} \square 1_{(k)} = H - Y_{(k)}^{b_{(k)}}$$

を生成し (図7の109)、全ての  $k = m + 1 + \dots, m + \dots$  に関して、 $Y_{(k)}^{b_{(k)}}$  を各計算装置の入力ゲートの公開鍵として公開する (図7の110)。

併せて、計算装置  $u_{(k)}$  は、各  $k$  に関して、 $b_{(k)} = 0$ 、または、 $b_{(k)} = 1$  に対して、

$$Y_{(k)}^{b_{(k)}} = [x_{(k)}^{b_{(k)}}]G \text{ なる } x_{(k)}^{b_{(k)}}$$

20

の知識を持っていることの証明を、別記述Bの方法に従って、入力ゲートの公開鍵の正当性証明として生成 (図7の111) し、公開する (図7の112)。

[ゲートに関する処理]

全ての計算装置  $\{u_{\alpha}\}$  は、公開情報取得手段を用いて、ゲート公開鍵

$$\{Y^{(\alpha)}_{(k)}, Z^{(\alpha)}\}_{\alpha=1, \dots, \lambda}$$

を取得する (図8の113)。全ての  $k = 1, \dots, m$  と全ての  $b \in \{0, 1\}$  に関して、各自統合したゲート公開鍵

30

$$Y^b_{(k)} = \sum_{\alpha=1}^{\lambda} Y^{(\alpha)}_{(k)}$$

$$Z = \sum_{\alpha=1}^{\lambda} Z^{(\alpha)}$$

を生成する (図8の114)。

全ての計算装置  $\{u_{\alpha}\}$  は、全ての  $k = 1, \dots, m$ 、全ての  $b, c \in \{0, 1\}$  に関して、

$$r^{(\alpha)}_{(k)} \in \mathbb{R}Z/qZ$$

を一様無作為に生成して、全ての  $k = 1, \dots, m$ 、全ての  $b, c \in \{0, 1\}$  に関して、楕円E1Gamma1暗号方式にて暗号化することで、ゲート秘密鍵の暗号文

40

$$(C^{(\alpha)bc}_{(k)}, D^{(\alpha)bc}_{(k)}) = ([r^{(\alpha)}_{(k)}]G, X^{(\alpha)}_{(k)} + [r^{(\alpha)}_{(k)}](Y^b_{(k)} + Y^c_{(k)} + Z))$$

を生成し (図8の115)、これらを公開する (図8の116)。但し、ゲート  $G_{(k)}$  には配線  $w_{(i)}$  と  $w_{(j)}$  が入力されるとする。

併せて、それぞれの  $k$  に関して、全ての  $b, c \in \{0, 1\}$  に関して、楕円E1Gamma1暗号文

$$(C^{(\alpha)bc0}_{(k)}, D^{(\alpha)bc0}_{(k)})$$

50

の復号結果が同じになること、それぞれの k に関して、全ての b, c ∈ {0, 1} に関して、楕円 E 1 G a m a 1 暗号文

$$(C^{(\alpha)bc1}_{[k]}, D^{(\alpha)bc1}_{[k]})$$

の復号結果が同じになることの証明を、別記述 C の方法を用いて、ゲート秘密鍵の暗号文の正当性証明として生成し (図 8 の 1 1 7)、公開する (図 8 の 1 1 8)。

全ての計算装置 { u } は各自、全ての k = 1, . . . , m、全ての b, c, μ, ν, ξ ∈ {0, 1} に関して、秘密鍵識別データ暗号文

$$(A^{(0)bc}_{[k] \mu, \nu, \xi}, B^{(0)bc}_{[k] \mu, \nu, \xi}) = (O, [\epsilon]G)$$

10

$$((C^{(0)\alpha bc}_{[k] \mu, \nu, \xi}, D^{(0)\alpha bc}_{[k] \mu, \nu, \xi}))_{\alpha=1, \dots, \lambda} = ((C^{(\alpha)bc \epsilon}_{[k]}, D^{(\alpha)bc \epsilon}_{[k]})_{\alpha=1, \dots, \lambda}$$

を生成する (図 8 の 1 1 9)。但し、

$$\epsilon = ((b \square \mu) \odot G \square (c \square \nu)) \square \xi.$$

[ 入力配線に関する処理 ]

全ての計算装置 { u } は、全ての k = m + 1, . . . , m + n、全ての b, c ∈ {0, 1} に関して

20

$$r^{(\alpha)\epsilon}_k \in \mathbb{R} Z/qZ$$

を一様無作為に生成し、全ての k = m + 1, . . . , m + n、全ての b, c ∈ {0, 1} に関して楕円 E 1 G a m a 1 暗号方式を用いて、入力の暗号文

$$(C^{(\alpha)bc\epsilon}_{[k]}, D^{(\alpha)bc\epsilon}_{[k]}) = ((r^{(\alpha)\epsilon}_{[k]}]G, X^{(\alpha)\epsilon}_{[k]} + [r^{(\alpha)\epsilon}_{[k]}](Y^{b}_{[k]} + Z))$$

を生成し (図 8 の 1 2 0)、これらを公開する (図 8 の 1 2 1)。併せて、それぞれの k に関して、全ての b ∈ {0, 1} に関して、楕円 E 1 G a m a 1 暗号文

30

$$(C^{(\alpha)bc0}_{[k]}, D^{(\alpha)b0}_{[k]})$$

の復号結果が同じになること、それぞれの k に関して、全ての b ∈ {0, 1} に関して、楕円 E 1 G a m a 1 暗号文

$$(C^{(\alpha)b1}_{[k]}, D^{(\alpha)b1}_{[k]})$$

の復号結果が同じになることの証明を、別記述 D の方法で、入力の暗号文の正当性証明として生成し (図 8 の 1 2 2)、公開する (図 8 の 1 2 3)。

全ての計算装置 { u } は各自、全ての k = m + 1, . . . , m + n、全ての b, c ∈ {0, 1} に関して、入力の暗号文識別データの暗号文

40

$$(A^{(0)b}_{[k] \xi}, B^{(0)b}_{[k] \xi}) = (O, [\epsilon]G) ((C^{(0)\alpha b}_{[k] \xi}, D^{(0)\alpha b}_{[k] \xi}))_{\alpha=1, \dots, \lambda} = ((C^{(\alpha)b \epsilon}_{[k]}, D^{(\alpha)b \epsilon}_{[k]})_{\alpha=1, \dots, \lambda}$$

を生成する (図 8 の 1 2 4)。但し  $\epsilon = b$ 。

[ 出力配線に関する処理 ]

全ての計算装置 { u } は各自、全ての配線 k = 1, . . . , l、全ての b, c ∈ {0, 1} に関して、出力の暗号文

$$A^{(0)b} [k] \xi, B^{(0)b} [k] \xi, \dots (O, [\epsilon] G)$$

を生成する (図 8 の 1 2 5)。但し  $\xi = b$ 。

[ 逐次置換再暗号処理 2 0 1 - - - ゲート暗号文の置換と再暗号 ]

次に、図 6 に示されるように、逐次置換再暗号処理 2 0 1 が行なわれる。この逐次置換再暗号処理 2 0 1 について、処理を詳細に示す図 9 および図 1 2 を参照して説明する。

$k = 1, \dots, m$  に関して順番に、計算装置  $u$  は以下の処理 (図 1 2 の 3 0 4) を行う (図 9 の 1 2 6)。この処理で各計算装置は、最初に公開情報取得手段を用いて必要なデータを取得し (図 1 2 の 3 1 0)、次に生成したデータを情報公開手段を用いて公開する (図 1 2 の 3 1 1)。個の計算装置には順番が定められており、それぞれの計算装置がデータを取得するには、この計算機よりも順番が前の計算機全てがデータの公開を終了しておかねばならない。

10

[ 暗号文取得処理 ]

$u$  は、 $k = 1, \dots, m$ 、全ての  $\xi = 1, \dots, \xi$ 、全ての  $b, c, \mu, \nu, \xi \in \{0, 1\}$  に関する

$$A^{(\alpha-1)bc} [k] \mu, \nu, \xi, B^{(\alpha-1)bc} [k] \mu, \nu, \xi, C^{(\alpha-1)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi, D^{(\alpha-1)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi,$$

全ての  $k = m + 1, \dots, m + n$ 、全ての  $\xi = 1, \dots, \xi$ 、全ての  $b, c, \mu, \nu, \xi \in \{0, 1\}$  に関する

20

$$A^{(\alpha-1)b} [k] \xi, B^{(\alpha-1)b} [k] \xi, C^{(\alpha-1)\beta b} [k] \xi, D^{(\alpha-1)\beta b} [k] \xi,$$

全ての  $k = 1, \dots, m + n$ 、全ての  $b, c, \mu, \nu, \xi \in \{0, 1\}$  に関する

$$A^{(0)b} [k] \xi, B^{(0)b} [k] \xi$$

を取得する (図 9 の 1 5 1)。

30

[ 配線の信号値と置換生成 ]

$u$  は、各配線の信号値の置換  $\{ T T (k) \in \{0, 1\} \} k = 1, \dots, m + n$  を一様無作為に生成する (図 9 の 1 2 7)。

[ 再暗号化の乱数生成 ]

$u$  は、ゲートの秘密鍵の再暗号化に使う乱数

$$\{ s^{(\alpha)bc} [k] \mu, \nu, \xi \}_{k=1, \dots, m; b, c, \mu, \nu, \xi \in R(0,1)}$$

$$\{ t^{(\alpha)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi \}_{k=1, \dots, m; \beta=1, \dots, \beta; b, c, \mu, \nu, \xi \in R(0,1)}$$

40

$$\{ s^{(\alpha)b} [k] \xi \}_{k=m+1, \dots, m+n; b, \xi \in R(0,1)}$$

$$\{ t^{(\alpha)\beta b} [k] \xi \}_{k=m+1, \dots, m+n; \beta=1, \dots, \beta; b, \xi \in R(0,1)}$$

$$\{ s^{(0)b} [k] \xi \}_{k=1, \dots, m; b, \xi \in R(0,1)}$$

を一様無作為に生成する (図 9 の 1 2 8)。

[ ゲートの秘密鍵の暗号文の置換と再暗号化 ]

50

全ての  $k = 1, \dots, m$ 、全ての  $i = 1, \dots, n$ 、全ての  $b, c, \mu, v, \xi \in \{0, 1\}$  に関して、

$$\begin{aligned}
A^{(\alpha)bc}_{[k]\mu, \nu, \xi} &= A^{(\alpha-1)bc}_{[k]\mu \square \pi(i), \nu \square \pi(j), \xi \square \pi(k)} + [s^{(\alpha)bc}_{[k]\mu, \nu, \xi}]G \\
B^{(\alpha)bc}_{[k]\mu, \nu, \xi} &= B^{(\alpha-1)bc}_{[k]\mu \square \pi(i), \nu \square \pi(j), \xi \square \pi(k)} + [s^{(\alpha)bc}_{[k]\mu, \nu, \xi}](Y^b_{[i]} + Y^c_{[j]} + Z) \\
C^{(\alpha)\beta bc}_{[k]\mu, \nu, \xi} &= C^{(\alpha-1)\beta bc}_{[k]\mu \square \pi(i), \nu \square \pi(j), \xi \square \pi(k)} + [t^{(\alpha)\beta bc}_{[k]\mu, \nu, \xi}]G \\
D^{(\alpha)\beta bc}_{[k]\mu, \nu, \xi} &= D^{(\alpha-1)\beta bc}_{[k]\mu \square \pi(i), \nu \square \pi(j), \xi \square \pi(k)} + [t^{(\alpha)\beta bc}_{[k]\mu, \nu, \xi}](Y^b_{[i]} + Y^c_{[j]} + Z)
\end{aligned}
\tag{10}$$

と、ゲート秘密鍵を置換し再暗号化したデータを生成し(図9の129)、  
[ 入力 of 暗号文の置換と再暗号化 ]

全ての  $k = m + 1, \dots, m + n$ 、全ての  $i = 1, \dots, n$ 、全ての  $b, c \in \{0, 1\}$  に関して、

$$\begin{aligned}
A^{(\alpha)b}_{[k]\xi} &= A^{(\alpha-1)b}_{[k]\xi \square \pi(k)} + [s^{(\alpha)b}_{[k]\xi}]G \\
B^{(\alpha)b}_{[k]\xi} &= B^{(\alpha-1)b}_{[k]\xi \square \pi(k)} + [s^{(\alpha)b}_{[k]\xi}](Y^b_{[k]} + Z) \\
C^{(\alpha)\beta b}_{[k]\xi} &= C^{(\alpha-1)\beta b}_{[k]\xi \square \pi(k)} + [t^{(\alpha)\beta b}_{[k]\xi}]G \\
D^{(\alpha)\beta b}_{[k]\xi} &= D^{(\alpha-1)\beta b}_{[k]\xi \square \pi(k)} + [t^{(\alpha)\beta b}_{[k]\xi}](Y^b_{[k]} + Z)
\end{aligned}
\tag{20}$$

と、入力 of 暗号文を置換し再暗号化したデータを生成し(図9の130)、  
[ 出力 of 暗号文の置換と再暗号化 ]

全ての  $k = 1, \dots, l$ 、全ての  $b, c \in \{0, 1\}$  に関して、

$$\begin{aligned}
A^\dagger(\alpha)b_{[k]\xi} &= A^\dagger(\alpha-1)b_{[k]\xi \square \pi(k)} + [s^\dagger(\alpha)b_{[k]\xi}]G \\
B^\dagger(\alpha)b_{[k]\xi} &= B^\dagger(\alpha-1)b_{[k]\xi \square \pi(k)} + [s^\dagger(\alpha)b_{[k]\xi}](Y^b_{[k]} + Z)
\end{aligned}$$

と、出力 of 暗号文を置換し再暗号化したデータを生成し(図9の131)、

[ 置換と再暗号化の正当性証明 ] 全ての  $k = 1, \dots, m$ 、全ての  $i = 1, \dots, n$ 、  
、全ての  $b, c, \mu, v, \xi \in \{0, 1\}$  に関する 40

$$\{A^{(\alpha)bc}_{[k]\mu, \nu, \xi}, B^{(\alpha)bc}_{[k]\mu, \nu, \xi}, C^{(\alpha)\beta bc}_{[k]\mu, \nu, \xi}, D^{(\alpha)\beta bc}_{[k]\mu, \nu, \xi}\}$$

及び、全ての  $k = m + 1, \dots, m + n$ 、全ての  $i = 1, \dots, n$ 、全ての  $b, c \in \{0, 1\}$  に関する

$$\{A^{(\alpha)b}_{[k]\xi}, B^{(\alpha)b}_{[k]\xi}, C^{(\alpha)\beta b}_{[k]\xi}, D^{(\alpha)\beta b}_{[k]\xi}\}$$

及び全ての  $k = 1, \dots, l$ 、全ての  $b \in \{0, 1\}$  に関する  $A^{\dagger(\lambda)^b[k]}$ 、 $B^{\dagger(\lambda)^b[k]}$  を  $u_{m+1}$  に送信する。

併せて上記処理を正当に行ったことの証明を、別記述 E の方法に従って、ゲートの秘密鍵の暗号文と入力の暗号文と出力の暗号文との置換と再暗号化の正当性証明として生成し公開する (図 9 の 132)。

[ 結果出力処理 202, 305 ]

次に、図 6 に示されるように、結果出力処理 202 が行なわれる。この結果出力処理 202 について、処理を詳細に示す図 10 ないし図 12 を参照して説明する。

結果出力処理 202 では情報公開手段と公開情報取得手段を使って、データの公開と取得の両方を行う (図 12 の 312)。最後に、各自回路の出力 (図 12 の 306) を出力する (図 12 の 313)。

[ ゲート暗号文の部分復号 ]

全ての計算装置  $\{u_i\}_{i=1, \dots, m}$  は、全ての  $k = 1, \dots, m, b \in \{0, 1\}, \alpha = 1, \dots, l$  に関して、

$$A^{\#(\lambda)abc}_{[k]000} = [z^{(\alpha)}]A^{(\lambda)bc}_{[k]000}$$

$$C^{\#(\lambda)\alpha\beta bc}_{[k]000} = [z^{(\alpha)}]C^{(\lambda)\beta bc}_{[k]000}$$

と、ゲート秘密鍵を部分復号し、結果を公開し (図 10 の 134)、全ての計算装置  $\{u_i\}_{i=1, \dots, m}$  は、全ての  $k = m+1, \dots, m+n, b \in \{0, 1\}, \alpha = 1, \dots, l$  に関して

$$A^{\#(\lambda)\alpha b}_{[k]0} = [z^{(\alpha)}]A^{(\lambda)b}_{[k]0}$$

$$C^{\#(\lambda)\alpha\beta b}_{[k]0} = [z^{(\alpha)}]C^{(\lambda)\beta b}_{[k]0}$$

と、入力の暗号文を部分復号し、結果を公開し (図 10 の 135)、全ての計算装置  $\{u_i\}_{i=1, \dots, m}$  は、 $k = 1, \dots, l, b \in \{0, 1\}$  に関して

$$A^{\dagger\#(\lambda)ab}_{[k]0} = [z^{(\alpha)}]A^{\dagger(\lambda)b}_{[k]0}$$

と、出力の暗号文を部分復号し、結果を公開する (図 10 の 136)。

併せて上記処理を正当に行ったことの証明を別記述 F の方法に従って、ゲート秘密鍵と入力の暗号文と出力の暗号文との部分復号の正当性証明として生成し公開する (図 10 の 137)。

[ ゲート暗号文の生成 ]

全ての計算装置は、さらに全ての  $k = 1, \dots, m$ 、全ての  $\alpha = 1, \dots, l$ 、全ての  $b, c \in \{0, 1\}$  に関して、

$$A^{bc}_{[k]} = A^{(\lambda)bc}_{[k]000}$$

$$B^{bc}_{[k]} = B^{(\lambda)bc}_{[k]000} - \sum_{\alpha=1}^l \lambda A^{\#(\lambda)abc}_{[k]000}$$

$$C^{abc}_{[k]} = C^{(\lambda)abc}_{[k]000}$$

$$D^{abc}_{[k]} = D^{(\lambda)abc}_{[k]000} - \sum_{\alpha=1}^l \lambda C^{\#(\lambda)\alpha\beta bc}_{[k]000}$$

を、全ての  $k = m+1, \dots, m+n$ 、全ての  $\alpha = 1, \dots, l$ 、全ての  $b \in \{0, 1\}$  に関して、

10

20

30

40

$$A^b_{[k]} = A(\lambda)^b_{[k]} \circ$$

$$B^b_{[k]} = B(\lambda)^b_{[k]} \circ - \sum_{\alpha=1}^{\lambda} A^{\#(\lambda)}_{\alpha} b_{[k]} \circ$$

$$C^{\alpha} b_{[k]} = C(\lambda)^{\alpha} b_{[k]} \circ$$

$$D^{\alpha} b_{[k]} = D(\lambda)^{\alpha} b_{[k]} \circ - \sum_{\alpha=1}^{\lambda} C^{\#(\lambda)}_{\alpha} \beta b_{[k]} \circ$$

10

を、全ての  $k = 1, \dots, l$ 、全ての  $b \in \{0, 1\}$  に関して、

$$A^{\dagger} b_{[k]} = A^{\dagger}(\lambda)^b_{[k]} \circ$$

$$B^{\dagger} b_{[k]} = B^{\dagger}(\lambda)^b_{[k]} \circ - A^{\dagger \#(\lambda)}_{\alpha} b_{[k]} \circ$$

をゲート暗号文として生成する (図10の138)。

[ 入力 の 復 号 ]

各計算装置  $u_{\gamma}^{(k)}$  は、全ての  $k = m+1 + \gamma - 1 \mid \gamma, \dots, m + \gamma = 1 \mid \gamma$ 、全ての  $\gamma = 1, \dots, l$  に関して、 $b^{\dagger} k$  を開示することなく

20

$$G^b_{[k]} = B^{b^{\dagger} k}_{[k]} - [x^{\sim b^{\dagger} k}_{[k]}] A^{b^{\dagger} k}_{[k]}$$

$$X^{b(\beta)}_{[k]} = D^{\beta b^{\dagger} k}_{[k]} - [x^{\sim b^{\dagger} k}_{[k]}] C^{\beta b^{\dagger} k}_{[k]}$$

$$x^{b(\beta)}_{[k]} = \phi(X^{b(\beta)}_{[k]})$$

を生成し、公開する (図10の139)。この公開したデータは入力 の 暗号文を復号したデータと呼ぶ。

30

全ての計算装置  $u_{\gamma}$  は、全ての  $k = m+1, \dots, m+n$ 、全ての  $\gamma = 1, \dots, l$  に関して、

$$Y^{(\beta)} \epsilon^{\dagger} k_{[k]} = [x^{b(\beta)}_{[k]}] G$$

を確認することで、入力 の 暗号文の復号の正当性を確認する (図10の140)。但し、もし  $G^b_{[k]} = 0$  なら  $k = 0$ 、 $G^b_{[k]} = G$  なら  $k = 1$  とする。

[ 回路 の 評 価 ]

全ての計算装置  $u_{\gamma}$  はそれぞれ、全てのゲート  $G_k$  ( $k = 1, \dots, m$ ) に関して適切な順番に、それらの入力から出力を以下のように求めていく (図10の141)。これが回路の評価の処理である。但しゲート  $G_k$  にはゲート  $G_i$  とゲート  $G_j$  の出力が入力されるとする。

40

全ての  $\gamma = 1, \dots, l$  に関して、

$$G^b_{[k]} = B^{b^{\dagger} i} b^{\dagger} j_{[k]} - [\sum_{\gamma=1}^{\lambda} (x^{(\gamma) b^{\dagger} i}_{[k]} + x^{(\gamma) b^{\dagger} j}_{[k]})] A^{b^{\dagger} i} b^{\dagger} j_{[k]}$$

$$X^{b(\beta)}_{[k]} = D^{\beta b^{\dagger} i} b^{\dagger} j_{[k]} - [\sum_{\gamma=1}^{\lambda} (x^{(\gamma) b^{\dagger} i}_{[k]} + x^{(\gamma) b^{\dagger} j}_{[k]})] C^{\beta b^{\dagger} i} b^{\dagger} j_{[k]}$$

$$x^{b(\beta)}_{[k]} = \phi(X^{b(\beta)}_{[k]})$$

50

を求め (図 10 の 142)、 $k = 1, \dots, l$  に関して、 $Y^{(k)} = [x^{(k)}] G$  を確認する (図 10 の 143)。但し、もし  $G^{(k)} = 0$  なら  $b^{(k)} = 0$ 、 $G^{(k)} = G$  なら  $b^{(k)} = 1$  とする。上記処理を行った  $k$  に関して、 $b^{(k)}$  とする。

[出力の評価]

ここまでの処理で公開した証明を検証者は検証する (図 10 の 144)。検証者が全ての証明文を受理したならば、すなわち不正が発見されなかったならば、以下の出力の復号と公開の処理を行う。

全ての計算装置  $u$  はそれぞれ、全ての  $k = 1, \dots, l$  に関して、

$$G^{\dagger}_{[k]} = B^{\dagger} b^{(k)}_{[k]} - [\sum_{\gamma=1}^{\lambda} x^{(\gamma)} b^{(k)}_{[k]}] A^{\dagger} b^{(k)}_{[k]}$$

を求める (図 10 の 145)。

全ての  $\{u\} = 1, \dots, l$  はそれぞれ、全ての  $k = 1, \dots, l$  に関して、

$$A^{\dagger \#}_{[k]} = [z^{(\alpha)}] A^{\dagger} b^{(k)}_{[k]}$$

を生成して (図 10 の 146) 公開する (図 10 の 147)。

併せてこの計算の正当性の証明を、別記述 G の方法に従って、出力の復号の正当性の証明生成と (図 10 の 148) して公開する (図 10 の 149)。

それぞれの  $u$  は、各自

$$G^{\#}_{[k]} = G^{\dagger}_{[k]} - \sum_{\gamma=1}^{\lambda} A^{\dagger \#}_{[k]}$$

から回路の出力 (図 11 の 306) を求める (図 10 の 150)。

$k = 1, \dots, l$  に関して、 $G^{(k)} = 0$  ならば  $b^{(k)} = 0$  であり、 $G^{(k)} = G$  ならば  $b^{(k)} = 1$  である。

[別記述処理]

[別記述 A]

証明者 (計算者)  $u$  は、全ての  $k = 1, \dots, m+n$ 、全ての  $b \in \{0, 1\}$  に関して、

$$x^{(\alpha)b}_{[k]} \in R \setminus qZ$$

$$z^{(\alpha)}_{[k]} \in R \setminus qZ$$

を一樣無作為に生成し、

$$Y^{(\alpha)b}_{[k]} \in [x^{(\alpha)b}_{[k]}] G$$

$$Z^{(\alpha)} = [z^{(\alpha)}] G$$

を生成する。さらに、

$$\theta = \text{Hash}(E, G, \{Y^{(\alpha)b}_{[k]}\}_{k=1, \dots, m+n; b=0, 1}, \{z^{(\alpha)}_{[k]}\}_{k=1, \dots, m+n; b=0, 1}, Z^{(\alpha)}) \text{ mod } q$$

を生成し、全ての  $k = 1, \dots, m+n$ 、全ての  $b \in \{0, 1\}$  に関して、

$$x^{''(\alpha)b}_{[k]} = \theta x^{(\alpha)b}_{[k]} + x^{(\alpha)b}_{[k]} \text{ mod } q$$

$$z^{''(\alpha)} = \theta z^{(\alpha)} + z^{(\alpha)} \text{ mod } q$$

10

20

30

40

50

を生成する。証明者は、全ての  $k = 1, \dots, m+n$ 、全ての  $b \in \{0, 1\}$  に関する

$$Y^{(\alpha)b}_{[k]}, Z^{(\alpha)}, z^{(\alpha)b}_{[k]}, z^{(\alpha)}$$

を証明とする。上記証明の検証方法は以下の通り。検証者は、

$$\theta = \text{Hash}(E, G, \{Y^{(\alpha)b}_{[k]}\}_{k=1, \dots, m+n; b=0, 1}, Z^{(\alpha)}, \{z^{(\alpha)b}_{[k]}\}_{k=1, \dots, m+n; b=0, 1}, Z^{(\alpha)}) \bmod q$$

を計算して、

$$[x^{(\alpha)b}_{[k]}]G = [\theta] Y^{(\alpha)b}_{[k]} + Y^{(\alpha)b}_{[k]} \tag{10}$$

$$[z^{(\alpha)}]G = \theta Z^{(\alpha)} + Z^{(\alpha)}$$

を確認する。

[別記述 B]

各証明者（計算者） $u$  は、全ての  $k = m+1 + \dots = 1 \dots - 1 \dots | \dots, \dots, m + \dots = 1 \dots | \dots$  に関して、選択した  $b \in \{0, 1\}$  に対して、

$$x^{b \Gamma k}_{[k]} \in \mathbb{R}Z/qZ$$

を一樣無作為に生成し、

20

$$Y^{b \Gamma k}_{[k]} = [x^{b \Gamma k}_{[k]}]G$$

を生成する。さらに、

$$\theta^{b \Gamma k} \square 1_{[k]} \in \mathbb{R}Z/qZ$$

$$x^{b \Gamma k} \square 1_{[k]} \in \mathbb{R}Z/qZ$$

30

を無作為に生成し、

$$Y^{b \Gamma k} \square 1_{[k]} = [x^{b \Gamma k} \square 1_{[k]}]G - [\theta^{b \Gamma k} \square 1_{[k]}] Y^{b \Gamma k} \square 1_{[k]}$$

を生成する。

$u$  は、全ての  $k = m+1 + \dots = 1 \dots - 1 \dots | \dots, \dots, m + \dots = 1 \dots | \dots$  に関して、

$$\theta_{[k]} = \text{Hash}(E, G, \{Y^{b \Gamma k}_{[k]}, Y^{b \Gamma k} \square 1_{[k]}\}_{b=0, 1}) \bmod q$$

40

$$\theta^{b \Gamma k}_{[k]} = \theta_{[k]} - \theta^{b \Gamma k} \square 1_{[k]} \bmod q$$

を生成する。さらに、

$$x^{b \Gamma k}_{[k]} = \theta^{b \Gamma k}_{[k]} x^{b \Gamma k} \square 1_{[k]} + x^{b \Gamma k}_{[k]} \bmod q$$

を生成する。

証明者  $u$  は、全ての  $k = m+1 + \dots = 1 \dots - 1 \dots | \dots, \dots, m + \dots = 1 \dots | \dots$

50

,  $b = 0, 1$  に関する

$$Y^{\sim b}_{[k]}, \theta^0_{[k]}, X^{\sim b}_{[k]}$$

を証明とする。

上記証明の検証方法は以下の通り。

検証者は、全ての

$$k = m + 1 + \sum_{\beta=1}^{\alpha-1} 1_{\beta}, \dots, m + \sum_{\beta=1}^{\alpha} 1_{\beta}, b = 0, 1$$

10

に関して、

$$\theta_{[k]} = \text{Hash}(E, G, \{Y^{\sim b}_{[k]}, Y^{\sim b}_{[k]}\}_{b=0,1}) \bmod q$$

$$\theta^1_{[k]} = \theta_{[k]} - \theta^0_{[k]} \bmod q$$

を生成し、全ての

$$k = m + 1 + \sum_{\beta=1}^{\alpha-1} 1_{\beta}, \dots, m + \sum_{\beta=1}^{\alpha} 1_{\beta}, b = 0, 1$$

20

に関して、

$$[X^{\sim b}_{[k]}]G = [\theta^b_{[k]}]Y^{\sim b}_{[k]} + Y^{\sim b}_{[k]}$$

$$Y^{\sim 0}_{[k]} + Y^{\sim 1}_{[k]} = H$$

が成り立つことを確認する。

[別記述 C]

証明者 (計算者)  $u$  は、全ての  $k = 1, \dots, m$ 、全ての  $b = 0, 1$  に関して、

30

$$r^{(\alpha)\varepsilon 0}_{[k]} \in \mathbb{Z}/q\mathbb{Z}$$

を一樣無作為に生成して、

$$F^{(\alpha)\varepsilon 0}_{[k]} = [r^{(\alpha)\varepsilon 0}_{[k]}]G$$

$$F^{(\alpha)\varepsilon 1}_{[k]} = [r^{(\alpha)\varepsilon 1}_{[k]}] (Y^1_{[j]} - Y^0_{[j]})$$

40

$$F^{(\alpha)\varepsilon 2}_{[k]} = [r^{(\alpha)\varepsilon 2}_{[k]}] (Y^1_{[j]} - Y^0_{[j]})$$

を生成する。

さらに、

$$\theta^{(\alpha)}_{[k]} = \text{Hash}(E, G, \{C^{(\alpha)bc\varepsilon}_{[k]}, D^{(\alpha)bc\varepsilon}_{[k]}\}_{k=1, \dots, m; b, c, \varepsilon=0,1}, \{F^{(\alpha)\varepsilon 0}_{[k]}, F^{(\alpha)\varepsilon 1}_{[k]}, F^{(\alpha)\varepsilon 2}_{[k]}\}_{k=1, \dots, m; \varepsilon=0,1})$$

50

を生成する。

次に、

$$r''(\alpha) \varepsilon_{[k]} = \theta(\alpha)_{[k]} r(\alpha) \varepsilon_{[k]} + r'(\alpha) \varepsilon_{[k]} \pmod{q}$$

を生成する。証明者は、 $k = 1, \dots, m$  及び  $\varepsilon = 0, 1$  に関する

$$F(\alpha) \varepsilon^0_{[k]}, F(\alpha) \varepsilon^1_{[k]}, F(\alpha) \varepsilon^2_{[k]}, r''(\alpha) \varepsilon_{[k]}$$

10

を証明とする。

上記証明の検証方法は以下の通り。

検証者は、最初にそれぞれの  $\varepsilon = 0, 1$ 、及び  $k = 1, \dots, m$  に関して、全ての  $b$ 、 $c = 0, 1$  に対する

$C(\varepsilon)^{b,c}_{[k]}$  が全て同じ値であることを確認する。

次に、

$$\theta(\alpha)_{[k]} = \text{Hash}(E, G, [C(\alpha)^{bc} \varepsilon_{[k]}, D(\alpha)^{bc} \varepsilon_{[k]}]_{k=1, \dots, m; b, c, \varepsilon=0,1}, [F(\alpha) \varepsilon^0_{[k]}, F(\alpha) \varepsilon^1_{[k]}, F(\alpha) \varepsilon^2_{[k]}]_{k=1, \dots, m; \varepsilon=0,1})$$

20

を生成する。次に、すべての  $k = 1, \dots, m$  及び  $\varepsilon = 0, 1$  に関して

$$[r''(\alpha) \varepsilon_{[k]}]G = [\theta(\alpha)_{[k]} C(\alpha)^{00} \varepsilon_{[k]} + F(\alpha) \varepsilon^0_{[k]}]$$

$$[r''(\alpha) \varepsilon_{[k]}] (Y^1_{[j]} - Y^0_{[j]}) = [\theta(\alpha)_{[k]} (D(\alpha)^{01} \varepsilon_{[k]} - D(\alpha)^{00} \varepsilon_{[k]}) + F(\alpha) \varepsilon^2_{[k]}]$$

$$[r''(\alpha) \varepsilon_{[k]}] (Y^1_{[j]} - Y^0_{[j]}) = [\theta(\alpha)_{[k]} (D(\alpha)^{10} \varepsilon_{[k]} - D(\alpha)^{00} \varepsilon_{[k]}) + F(\alpha) \varepsilon^1_{[k]}]$$

$$(D(\alpha)^{11} \varepsilon_{[k]} - D(\alpha)^{10} \varepsilon_{[k]}) = (D(\alpha)^{01} \varepsilon_{[k]} - D(\alpha)^{00} \varepsilon_{[k]})$$

30

が成り立つことを確認する。

[別記述 D]

証明者（計算者） $u$  は、全ての  $k = m+1, \dots, m+n$ 、全ての  $b$ 、 $\varepsilon = 0, 1$  に関して、

$$r^i(\alpha)^b_{[k]} \in \mathbb{Z}/q\mathbb{Z}$$

を一樣無作為に生成して、

$$F(\alpha) \varepsilon^0_{[k]} = [r^{\sim}(\alpha) \varepsilon_{[k]}]G$$

40

$$F(\alpha) \varepsilon^1_{[k]} = [r^{\sim}(\alpha) \varepsilon_{[k]}] (Y^1_{[k]} - Y^0_{[k]})$$

を生成する。さらに、全ての  $k = m+1, \dots, m+n$  に関して

$$\theta(\alpha)_{[k]} = \text{Hash}(E, G, [C(\alpha)^b \varepsilon_{[k]}, D(\alpha)^b \varepsilon_{[k]}, F(\alpha)^b \varepsilon_{[k]}]_{k=m+1, \dots, m+n; b, \varepsilon=0,1})$$

を生成する。

次に、全ての  $k = m+1, \dots, m+n$ 、全ての  $b$ 、 $\varepsilon = 0, 1$  に関して、

50

$$r^{m(\alpha)} \varepsilon_{[k]} = \theta(\alpha)_{[k]} r^{(\alpha)} \varepsilon_{[k]} + r^{m(\alpha)} \varepsilon_{[k]} \pmod q$$

を生成する。証明者は、 $k = m + 1, \dots, m + n$  及び  $\varepsilon = 0, 1$  に関する

$$F(\alpha) \varepsilon 0_{[k]}, F(\alpha) \varepsilon 1_{[k]}, r^{m(\alpha)} \varepsilon_{[k]}$$

を証明とする。

上記証明の検証方法は以下の通り。検証者は、最初にそれぞれの  $\varepsilon = 0, 1$ 、及び  $k = 1, \dots, m$  に関して、全ての  $b = 0, 1$  に対する

$$C(\alpha)^b \varepsilon_{[k]}$$

が全て同じ値であることを確認する。

次に、

$$\theta(\alpha)_{[k]} = \text{Hash}(E, G, \{C(\alpha)^b \varepsilon_{[k]}, D(\alpha)^b \varepsilon_{[k]}, F(\alpha)^b \varepsilon_{[k]}\}_{k=m+1, \dots, m+n; b, \varepsilon=0,1})$$

を生成する。

次に、すべての  $k = m + 1, \dots, m + n$  及び  $E = 0, 1$  に関して

$$[r^{m(\alpha)} \varepsilon_{[k]}]G = [\theta(\alpha)_{[k]} C(\alpha)^0 \varepsilon_{[k]} + F(\alpha) \varepsilon 0_{[k]}]$$

$$[r^{m(\alpha)} \varepsilon_{[k]}] (Y^{-1}_{[j]} - Y^0_{[j]}) = [\theta(\alpha)_{[k]} (D(\alpha)^1 \varepsilon_{[k]} - D(\alpha)^0 \varepsilon_{[k]}) + F(\alpha) \varepsilon 1_{[k]}]$$

が成り立つことを確認する。

[別記述 E]

$\mu = 1, \dots, \lambda$  に関して順番に、計算者  $u$  は以下の処理を行う。

$u$  は、

$$\sum_{h=0,1/3,2/3} \sigma^{(\alpha-h)bc} [k]_{\mu, \nu, \xi} = s^{(\alpha)bc} [k]_{\mu, \nu, \xi} \pmod q$$

$$\sum_{h=0,1/3,2/3} \tau^{(\alpha-h)\beta bc} [k]_{\mu, \nu, \xi} = t^{(\alpha)\beta bc} [k]_{\mu, \nu, \xi} \pmod q$$

なる

$$\{\sigma^{(\alpha-h)bc} [k]_{\mu, \nu, \xi}, \tau^{(\alpha-h)\beta bc} [k]_{\mu, \nu, \xi}\}_{k=1, \dots, m; \beta=1, \dots, \lambda; h=2/3, 1/3, 0; b, c, \mu, \nu, \xi \in \{0, 1\}}$$

を  $Z/qZ$  から一様無作為に選び、全ての  $k = 1, \dots, m$ 、全ての  $b, c, \mu, \nu, \xi \in \{0, 1\}$  に関して、

$$A^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi = A^{(\alpha-1)bc} [k] \mu \square \pi(i), \nu, \xi + [\sigma^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi] G$$

$$B^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi = B^{(\alpha-1)bc} [k] \mu \square \pi(i), \nu, \xi + [\sigma^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi] (Y^b [i] + Y^c [j] + Z)$$

$$C^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi = C^{(\alpha-1)\beta bc} [k] \mu \square \pi(i), \nu, \xi + [\tau^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi] G$$

$$D^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi = D^{(\alpha-1)\beta bc} [k] \mu \square \pi(i), \nu, \xi + [\tau^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi] (Y^b [i] + Y^c [j] + Z)$$

10

$$A^{(\alpha-1/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi = A^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi + [\sigma^{(\alpha-1/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi] G$$

$$B^{(\alpha-1/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi = B^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi + [\sigma^{(\alpha-1/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi] (Y^b [i] + Y^c [j] + Z)$$

$$C^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi = C^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi + [\tau^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi] G$$

20

$$D^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi = D^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi + [\tau^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi] (Y^b [i] + Y^c [j] + Z)$$

$$A^{(\alpha)bc} [k] \mu, \nu, \xi = A^{(\alpha-1/3)bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi + [\sigma^{(\alpha)bc} [k] \mu, \nu, \xi] G$$

$$B^{(\alpha)bc} [k] \mu, \nu, \xi = B^{(\alpha-1/3)bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi + [\sigma^{(\alpha)bc} [k] \mu, \nu, \xi] (Y^b [i] + Y^c [j] + Z)$$

$$C^{(\alpha)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi = C^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi + [\tau^{(\alpha)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi] G$$

30

$$D^{(\alpha)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi = D^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi + [\tau^{(\alpha)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi] (Y^b [i] + Y^c [j] + Z)$$

を生成する。

次に、全ての  $k = 1, \dots, m$ 、全ての  $i = 1, \dots, n$ 、全ての  $h = 2/3, 1/3, 0$ 、全ての  $b, c, \mu, \nu \in \{0, 1\}$  に関して、

$$\sigma^{(\alpha-h)bc} [k] \mu, \nu, \xi, \tau^{(\alpha-h)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi,$$

40

を  $Z/qZ$  から一様無作為に選び、全ての  $k = 1, \dots, m$ 、全ての  $i = 1, \dots, n$ 、全ての  $b, c, \mu, \nu \in \{0, 1\}$  に関して、

$$A^{(\alpha-2/3)bc} [k] \pi(i), \mu, \nu, \xi = A^{(\alpha-1)bc} [k] \mu \square \pi(i), \nu, \xi + [\sigma^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi] G$$

$$B^{(\alpha-2/3)bc} [k] \pi(i) : \mu, \nu, \xi = B^{(\alpha-1)bc} [k] \mu \square \pi(i), \nu, \xi + [\sigma^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi] (\gamma^b [i] + \gamma^c [j] + Z)$$

$$C^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \pi(i), \mu, \nu, \xi = C^{(\alpha-1)\beta bc} [k] \mu \square \pi(i), \nu, \xi + [\tau^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi] G$$

$$D^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \pi(i), \mu, \nu, \xi = D^{(\alpha-1)\beta bc} [k] \mu \square \pi(i), \nu, \xi + [\tau^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi] (\gamma^b [i] + \gamma^c [j] + Z)$$

10

$$A^{(\alpha-1/3)bc} [k] \pi(j) \mu, \nu, \xi = A^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi + [\sigma^{(\alpha-1/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi] G$$

$$B^{(\alpha-1/3)bc} [k] \pi(j) \mu, \nu, \xi = B^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi + [\sigma^{(\alpha-1/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi] (\gamma^b [i] + \gamma^c [j] + Z)$$

$$C^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \pi(j) \mu, \nu, \xi = C^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi + [\tau^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi] G$$

20

$$D^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \pi(j) \mu, \nu, \xi = D^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi + [\tau^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi] (\gamma^b [i] + \gamma^c [j] + Z)$$

$$A^{(\alpha)bc} [k] \pi(k) \mu, \nu, \xi = A^{(\alpha-1/3)bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi + [\sigma^{(\alpha)bc} [k] \mu, \nu, \xi] G$$

$$B^{(\alpha)bc} [k] \pi(k) \mu, \nu, \xi = B^{(\alpha-1/3)bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi + [\sigma^{(\alpha)bc} [k] \mu, \nu, \xi] (\gamma^b [i] + \gamma^c [j] + Z)$$

30

$$C^{(\alpha)\beta bc} [k] \pi(k) \mu, \nu, \xi = C^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi + [\tau^{(\alpha)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi] G$$

$$D^{(\alpha)\beta bc} [k] \pi(k) \mu, \nu, \xi = D^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi + [\tau^{(\alpha)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi] (\gamma^b [i] + \gamma^c [j] + Z)$$

を生成する。

さらに全ての  $k = m + 1, \dots, m + n$ 、全ての  $\xi = 1, \dots, \xi$ 、全ての  $b \in \{0, 1\}$  に関して、

$$s^{(\alpha)b} [k], \xi, t^{(\alpha)b} [k], \xi$$

40

を  $Z / qZ$  から一様無作為に選び、全ての  $k = m + 1, \dots, m + n$ 、全ての  $b \in \{0, 1\}$  に関して、

$$A^{(\alpha)b} [k] \pi(k, \xi) = A^{(\alpha-1)b} [k] \xi \square \pi(k) + [s^{(\alpha)b} [k] \xi] G$$

$$B^{(\alpha)b} [k] \pi(k, \xi) = B^{(\alpha-1)b} [k] \xi \square \pi(k) + [s^{(\alpha)b} [k] \xi] (Y^b [k] + Z)$$

$$C^{(\alpha)\beta b} [k] \pi(k, \xi) = C^{(\alpha-1)\beta b} [k] \xi \square \pi(k) + [t^{(\alpha)\beta b} [k] \xi] G$$

$$D^{(\alpha)\beta b} [k] \pi(k, \xi) = D^{(\alpha-1)\beta b} [k] \xi \square \pi(k) + [t^{(\alpha)\beta b} [k] \xi] (Y^b [k] + Z) \quad 10$$

を生成する。さらに全ての  $k = 1, \dots, l$ , 全ての  $b, \dots, \{0, 1\}$  に関して、

$$s^{(\alpha)b} [k] \xi,$$

を  $Z/qZ$  から一様無作為に選び、全ての  $k = 1, \dots, l$ , 全ての  $b, \dots, \{0, 1\}$  に関して、

$$A^{\dagger(\alpha)b} [k] \pi(k, \xi) = A^{\dagger(\alpha-1)b} [k] \xi \square \pi(k) + [s^{\dagger(\alpha)b} [k] \xi] G \quad 20$$

$$B^{\dagger(\alpha)b} [k] \pi(k, \xi) = B^{\dagger(\alpha-1)b} [k] \xi \square \pi(k) + [s^{\dagger(\alpha)b} [k] \xi] (Y^b [k] + Z)$$

を生成する。

次に、全ての  $k = 1, \dots, m$ 、全ての  $h = 2/3, 1/3, 0$  に関して、

$$\theta^{(\alpha)} [k] \pi(i) \square 1,$$

を  $Z/qZ$  から一様無作為に選ぶ。

次に、全ての  $k = 1, \dots, m$ 、全ての  $i = 1, \dots, n$ 、全ての  $b, c, \mu, \nu, \xi, \dots, \{0, 1\}$  に関して、

$$\sigma^{(\alpha-2/3)bc} [k] \pi(i) \square 1, \mu, \nu, \xi, \sigma^{(\alpha-1/3)bc} [k] \pi(i) \square 1, \mu, \nu, \xi, \sigma^{(\alpha)bc} [k]$$

$$\pi(k) \square 1, \mu, \nu, \xi, \tau^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \pi(i) \square 1, \mu, \nu, \xi, \tau^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k]$$

$$\pi(i) \square 1, \mu, \nu, \xi, \tau^{(\alpha)\beta bc} [k] \pi(k) \square 1, \mu, \nu, \xi$$

を  $Z/qZ$  から一様無作為に選ぶ。

次に、全ての  $k = m+1, \dots, m+n$ 、全ての  $i = 1, \dots, n$ 、全ての  $b, c, \mu, \nu, \xi, \dots, \{0, 1\}$  に関して、

$$s^{(\alpha)b} [k] \pi(k) \square 1, \xi, t^{(\alpha)\beta b} [k] \pi(k) \square 1, \xi$$

を  $Z/qZ$  から一様無作為に選ぶ。次に、全ての  $k = 1, \dots, l$ 、全ての  $b, c, \mu, \nu, \xi, \dots, \{0, 1\}$  に関して、

$$s^{\dagger(\alpha)b} [k] \pi(k) \square 1, \xi, t^{\dagger(\alpha)b} [k] \pi(k) \square 1, \xi$$

を  $Z/qZ$  から一様無作為に選ぶ。

次に、全ての  $k = 1, \dots, m$ 、全ての  $j = 1, \dots, n$ 、全ての  $b, c, \mu, \nu, \xi \in \{0, 1\}$  に関して、

$$A^{(\alpha-2/3)bc} [k] \pi(i) \square 1, \mu, \nu, \xi = [\sigma^{(\alpha-2/3)bc} [k] \pi(i) \square 1, \mu, \nu, \xi] G - [\theta^{(\alpha)} [k] \pi(i) \square 1] A^{(\alpha-1)bc} [k] \mu \square \pi(i), \nu, \xi$$

$$B^{(\alpha-2/3)bc} [k] \pi(i) \square 1, \mu, \nu, \xi = [\sigma^{(\alpha-2/3)bc} [k] \pi(i) \square 1, \mu, \nu, \xi] (Y^b [i] + Y^c [j] + Z) - [\theta^{(\alpha)} [k] \pi(i) \square 1] B^{(\alpha-1)bc} [k] \mu \square \pi(i), \nu, \xi$$

$$C^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \pi(i) \square 1, \mu, \nu, \xi = [\tau^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \pi(i) \square 1, \mu, \nu, \xi] G - [\theta^{(\alpha)} [k] \pi(i) \square 1] C^{(\alpha-1)\beta bc} [k] \mu \square \pi(i), \nu, \xi$$

10

$$D^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \pi(i) \square 1, \mu, \nu, \xi = [\tau^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \pi(i) \square 1, \mu, \nu, \xi] (Y^b [i] + Y^c [j] + Z) - [\theta^{(\alpha)} [k] \pi(i) \square 1] D^{(\alpha-1)\beta bc} [k] \mu \square \pi(i), \nu, \xi$$

$$A^{(\alpha-1/3)bc} [k] \pi(j) \square 1, \mu, \nu, \xi = [\sigma^{(\alpha-1/3)bc} [k] \pi(j) \square 1, \mu, \nu, \xi] G - [\theta^{(\alpha)} [k] \pi(j) \square 1] A^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi$$

$$B^{(\alpha-1/3)bc} [k] \pi(j) \square 1, \mu, \nu, \xi = [\sigma^{(\alpha-1/3)bc} [k] \pi(j) \square 1, \mu, \nu, \xi] (Y^b [i] + Y^c [j] + Z) - [\theta^{(\alpha)} [k] \pi(j) \square 1] B^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi$$

20

$$C^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \pi(j) \square 1, \mu, \nu, \xi = [\tau^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \pi(j) \square 1, \mu, \nu, \xi] G - [\theta^{(\alpha)} [k] \pi(j) \square 1] C^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi$$

$$D^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \pi(j) \square 1, \mu, \nu, \xi = [\tau^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \pi(j) \square 1, \mu, \nu, \xi] (Y^b [i] + Y^c [j] + Z) - [\theta^{(\alpha)} [k] \pi(j) \square 1] D^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \mu, \nu \square \pi(j), \xi$$

$$A^{(\alpha)bc} [k] \pi(k) \square 1, \mu, \nu, \xi = [\sigma^{(\alpha)bc} [k] \pi(k) \square 1, \mu, \nu, \xi] G - [\theta^{(\alpha)} [k] \pi(k) \square 1] A^{(\alpha-1/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi \square \pi(k)$$

30

$$B^{(\alpha)bc} [k] \pi(k) \square 1, \mu, \nu, \xi = [\sigma^{(\alpha)bc} [k] \pi(k) \square 1, \mu, \nu, \xi] (Y^b [i] + Y^c [j] + Z) - [\theta^{(\alpha)} [k] \pi(k) \square 1] B^{(\alpha-1/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi \square \pi(k)$$

$$C^{(\alpha)\beta bc} [k] \pi(k) \square 1, \mu, \nu, \xi = [\tau^{(\alpha)\beta bc} [k] \pi(k) \square 1, \mu, \nu, \xi] G - [\theta^{(\alpha)} [k] \pi(k) \square 1] C^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi \square \pi(k)$$

$$D^{(\alpha)\beta bc} [k] \pi(k) \square 1, \mu, \nu, \xi = [\tau^{(\alpha)\beta bc} [k] \pi(k) \square 1, \mu, \nu, \xi] (Y^b [i] + Y^c [j] + Z) - [\theta^{(\alpha)} [k] \pi(k) \square 1] D^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi \square \pi(k)$$

40

を生成する。

次に、全ての  $k = m + 1, \dots, m + n$ 、全ての  $j = 1, \dots, n$ 、全ての  $b, c, \mu, \nu, \xi \in \{0, 1\}$  に関して、

$$A^{(\alpha)b}_{[k]} \pi(i) \square 1, \xi = [s^{n(\alpha-1)b}_{[k]} \pi(i) \square 1, \xi] G - [\theta^{(\alpha)}_{[k]} \pi(i) \square 1] A^{(\alpha-1)b}_{[k]} \xi \square \pi(i)$$

$$B^{(\alpha)b}_{[k]} \pi(i) \square 1, \xi = [s^{n(\alpha-1)b}_{[k]} \pi(i) \square 1, \xi] (Y^{b}_{[k]} + Z) - [\theta^{(\alpha)}_{[k]} \pi(i) \square 1] B^{(\alpha-1)b}_{[k]} \xi \square \pi(i)$$

$$C^{(\alpha)\beta b}_{[k]} \pi(i) \square 1, \xi = [t^{n(\alpha-1)\beta b}_{[k]} \pi(i) \square 1, \xi] G - [\theta^{(\alpha)}_{[k]} \pi(i) \square 1] C^{(\alpha-1)\beta b}_{[k]} \xi \square \pi(i)$$

$$D^{(\alpha)\beta b}_{[k]} \pi(i) \square 1, \xi = [t^{n(\alpha-1)\beta b}_{[k]} \pi(i) \square 1, \xi] (Y^{b}_{[k]} + Z) - [\theta^{(\alpha)}_{[k]} \pi(i) \square 1] D^{(\alpha-1)\beta b}_{[k]} \xi \square \pi(i)$$

10

を生成する。

次に、全ての  $k = 1, \dots, 1$ 、全ての  $b \in \{0, 1\}$  に関して、

$$A^{\dagger(\alpha)b}_{[k]} \pi(i) \square 1, \xi = [s^{\dagger n(\alpha-1)b}_{[k]} \pi(i) \square 1, \xi] G - [\theta^{(\alpha)}_{[k]} \pi(i) \square 1] A^{\dagger(\alpha-1)b}_{[k]} \xi \square \pi(i)$$

$$B^{\dagger(\alpha)b}_{[k]} \pi(i) \square 1, \xi = [s^{\dagger n(\alpha-1)b}_{[k]} \pi(i) \square 1, \xi] (Y^{b}_{[k]} + Z) - [\theta^{(\alpha)}_{[k]} \pi(i) \square 1] B^{\dagger(\alpha-1)b}_{[k]} \xi \square \pi(i)$$

20

を生成する。

次に、

S = { E, G,

{

$$A^{(\alpha-h)bc} [k] \mu, \nu, \xi, B^{(\alpha-h)bc} [k] \mu, \nu, \xi, C^{(\alpha-h)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi, D^{(\alpha-h)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi.$$

$$A^{(\alpha-h)bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi, B^{(\alpha-h)bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi, C^{(\alpha-h)\beta bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi, D^{(\alpha-h)\beta bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi$$

10

$$k=1, \dots, m; h=2/3, 1/3, 0; \beta=1, \dots, \lambda; b, c, \mu, \nu, \xi, \zeta \in \{0, 1\}$$

{

$$A^{(\alpha)b} [k] \xi, B^{(\alpha)b} [k] \xi, C^{(\alpha)\beta b} [k] \xi, D^{(\alpha)\beta b} [k] \xi.$$

$$A^{(\alpha)b} [k] \xi, \xi, B^{(\alpha)b} [k] \xi, \xi, C^{(\alpha)\beta b} [k] \xi, \xi, D^{(\alpha)\beta b} [k] \xi, \xi$$

20

$$k=m+1, \dots, m+n; \beta=1, \dots, \lambda; b, \xi, \zeta \in \{0, 1\}$$

{

$$A^{\dagger(\alpha)b} [k] \xi, B^{\dagger(\alpha)b} [k] \xi$$

$$A^{\dagger(\alpha)b} [k] \xi, \xi, B^{\dagger(\alpha)b} [k] \xi, \xi$$

$$k=1, \dots, l; b, \xi, \zeta \in \{0, 1\}$$

30

を生成する。

次に、各 u は、全ての k = 1, . . . , m + n に関して

$$\theta^{(\alpha)} [k] = \text{Hash}(E, G, k, S)$$

を生成する。

次に、全ての k = 1, . . . , m + n に関して

$$\theta^{(\alpha)} [k] \pi(i) = \theta^{(\alpha)} [k] - \theta^{(\alpha)} [k] \pi(i) \square 1$$

40

を生成する。次に、全ての k = 1, . . . , m、全ての = 1, . . . , 、全ての h = 2 / 3 , 1 / 3 , 0、全ての b , c , μ , . . . { 0 , 1 } に関して、

$$\sigma^{(\alpha-h)bc} [k] \pi(i), \mu, \nu, \xi = \theta(\alpha) [k] \pi(i) \sigma^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi + \sigma^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi \pmod{q}$$

$$\tau^{(\alpha-h)\beta bc} [k] \pi(i), \mu, \nu, \xi = \theta(\alpha) [k] \pi(i) \tau^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi + \tau^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi \pmod{q}$$

を生成する。

次に、全ての  $k = m + 1, \dots, m + n$ 、全ての  $b = 1, \dots, \lambda$ 、全ての  $\xi \in \{0, 1\}$  に関して、

$$s^{(\alpha)b} [k] \pi(i) \xi = \theta(\alpha) [k] \pi(i) s^{(\alpha-1)b} [k] \xi + s^{(\alpha-1)b} [k] \xi \pmod{q}$$

$$t^{(\alpha)\beta b} [k] \pi(i) \xi = \theta(\alpha) [k] \pi(i) t^{(\alpha-1)\beta b} [k] \xi + t^{(\alpha-1)\beta b} [k] \xi \pmod{q}$$

を生成する。

次に、全ての  $k = 1, \dots, m$ 、全ての  $b = 1, \dots, \lambda$ 、全ての  $\xi \in \{0, 1\}$  に関して、

$$s^{(\alpha)b} [k] \pi(i) \xi = \theta(\alpha) [k] \pi(i) s^{(\alpha-1)b} [k] \xi + s^{(\alpha-1)b} [k] \xi \pmod{q}$$

を生成する。

最後に、全ての

$$k=1, \dots, m; h=2/3, 1/3, 0; \beta=1, \dots, \lambda; b, c, \mu, \nu, \xi, \zeta \in \{0, 1\}$$

に関する

$$A^{(\alpha-h)bc} [k] \mu, \nu, \xi, B^{(\alpha-h)bc} [k] \mu, \nu, \xi, C^{(\alpha-h)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi, D^{(\alpha-h)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi,$$

$$A^{(\alpha-h)bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi, B^{(\alpha-h)bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi, C^{(\alpha-h)\beta bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi, D^{(\alpha-h)\beta bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi,$$

$$\sigma^{(\alpha)b} [k] \xi, \xi, \tau^{(\alpha)\beta b} [k] \xi, \xi.$$

及び、全ての

$$k=m+1, \dots, m+n; \beta=1, \dots, \lambda; b, \xi, \zeta \in \{0, 1\}$$

に関する

10

20

30

40

$$A^{(\alpha)}b_{[k]\xi}, B^{(\alpha)}b_{[k]\xi}, C^{(\alpha)}\beta b_{[k]\xi}, D^{(\alpha)}\beta b_{[k]\xi},$$

$$A^{(\alpha)}b_{[k]\xi, \xi}, B^{(\alpha)}b_{[k]\xi, \xi}, C^{(\alpha)}\beta b_{[k]\xi, \xi}, D^{(\alpha)}\beta b_{[k]\xi, \xi},$$

$$s^{(\alpha-h)bc}_{[k]\xi, \mu, \nu, \xi}, t^{(\alpha-h)\beta bc}_{[k]\xi, \mu, \nu, \xi},$$

及び、全ての

10

$$k=1, \dots, l; b, \xi, \zeta \in \{0, 1\}$$

に関する

$$A^{\dagger(\alpha)}b_{[k]\xi}, B^{\dagger(\alpha)}b_{[k]\xi},$$

$$A^{\dagger(\alpha)}b_{[k]\xi, \xi}, B^{\dagger(\alpha)}b_{[k]\xi, \xi},$$

20

$$s^{\dagger(\alpha-h)bc}_{[k]\xi, \mu, \nu, \xi},$$

及び、全ての  $k = 1, \dots, m+n$  に関する

$$\theta^{(\alpha)}_{[k]\xi}$$

を証明とする。上記証明の検証方法は以下の通り。

検証者は、

$S = \{E, G,$

{

$A^{(\alpha-h)bc}{}_{[k] \mu, \nu, \xi}, B^{(\alpha-h)bc}{}_{[k] \mu, \nu, \xi}, C^{(\alpha-h)\beta bc}{}_{[k] \mu, \nu, \xi}, D^{(\alpha-h)\beta bc}{}_{[k] \mu, \nu, \xi},$

$A^{(\alpha-h)bc}{}_{[k] \xi, \mu, \nu, \xi}, B^{(\alpha-h)bc}{}_{[k] \xi, \mu, \nu, \xi}, C^{(\alpha-h)\beta bc}{}_{[k] \xi, \mu, \nu, \xi}, D^{(\alpha-h)\beta bc}{}_{[k] \xi, \mu, \nu, \xi}$

10

$\}_{k=1, \dots, m; h=2/3, 1/3, 0; \beta=1, \dots, \lambda; b, c, \mu, \nu, \xi, \zeta \in [0, 1]}$

{

$A^{(\alpha)b}{}_{[k] \xi}, B^{(\alpha)b}{}_{[k] \xi}, C^{(\alpha)\beta b}{}_{[k] \xi}, D^{(\alpha)\beta b}{}_{[k] \xi},$

$A^{(\alpha)b}{}_{[k] \xi, \xi}, B^{(\alpha)b}{}_{[k] \xi, \xi}, C^{(\alpha)\beta b}{}_{[k] \xi, \xi}, D^{(\alpha)\beta b}{}_{[k] \xi, \xi}$

20

$\}_{k=m+1, \dots, m+n; \beta=1, \dots, \lambda; b, \xi, \zeta \in [0, 1]}$

{

$A^\dagger(\alpha)b_{[k] \xi}, B^\dagger(\alpha)b_{[k] \xi}$

$A^\dagger(\alpha)b_{[k] \xi, \xi}, B^\dagger(\alpha)b_{[k] \xi, \xi}$

$\}_{k=1, \dots, l; b, \xi, \zeta \in [0, 1]}$

30

を生成し、各  $u$  は、全ての  $k = 1, \dots, m + n$  に関して

$$\theta(\alpha)_{[k]} = \text{Hash}(E, G, k, S)$$

を生成し、全ての  $k = 1, \dots, m$  に関して、

$$\theta(\alpha)_{[k]0} + \theta(\alpha)_{[k]1} = \theta(\alpha)_{[k]}$$

が成り立つことを確認する。検証者は次に、

40

$$k=1, \dots, m; h=2/3, 1/3, 0; \beta=1, \dots, \lambda; b, c, \mu, \nu, \xi, \zeta \in [0, 1]$$

に関して

$$[\sigma^{-(\alpha-2/3)bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi] G = [\theta(\alpha) [k] \xi] (A^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi - A^{(\alpha-1)bc} [k] \mu \square \xi, \nu, \xi) - A^{(\alpha-2/3)bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi$$

$$[\sigma^{-(\alpha-2/3)bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi] (Y^b [i] + Y^c [j] + Z) = [\theta(\alpha) [k] \xi] (B^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi - B^{(\alpha-1)bc} [k] \mu \square \xi, \nu, \xi) - B^{(\alpha-2/3)bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi$$

$$[\tau^{-(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi] G = [\theta(\alpha) [k] \xi] (C^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi - C^{(\alpha-1)\beta bc} [k] \mu \square \xi, \nu, \xi) - C^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi$$

10

$$[\tau^{-(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi] (Y^b [i] + Y^c [j] + Z) = [\theta(\alpha) [k] \xi] (D^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi - D^{(\alpha-1)\beta bc} [k] \mu \square \xi, \nu, \xi) - D^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi$$

$$[\sigma^{-(\alpha-1/3)bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi] G = [\theta(\alpha) [k] \xi] (A^{(\alpha-1/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi - A^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu \square \xi, \nu, \xi) - A^{(\alpha-1/3)bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi$$

$$[\sigma^{-(\alpha-1/3)bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi] (Y^b [i] + Y^c [j] + Z) = [\theta(\alpha) [k] \xi] (B^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi - B^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu \square \xi, \nu, \xi) - B^{(\alpha-1/3)bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi$$

20

$$[\tau^{-(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi] G = [\theta(\alpha) [k] \xi] (C^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi - C^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \mu \square \xi, \nu, \xi) - C^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi$$

$$[\tau^{-(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi] (Y^b [i] + Y^c [j] + Z) = [\theta(\alpha) [k] \xi] (D^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi - D^{(\alpha-2/3)\beta bc} [k] \mu \square \xi, \nu, \xi) - D^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi$$

$$[\sigma^{-(\alpha)bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi] G = [\theta(\alpha) [k] \xi] (A^{(\alpha)bc} [k] \mu, \nu, \xi - A^{(\alpha-1/3)bc} [k] \mu \square \xi, \nu, \xi) - A^{(\alpha)bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi$$

30

$$[\sigma^{-(\alpha)bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi] (Y^b [i] + Y^c [j] + Z) = [\theta(\alpha) [k] \xi] (B^{(\alpha-1/3)bc} [k] \mu, \nu, \xi - B^{(\alpha-2/3)bc} [k] \mu \square \xi, \nu, \xi) - B^{(\alpha)bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi$$

$$[\tau^{-(\alpha)\beta bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi] G = [\theta(\alpha) [k] \xi] (C^{(\alpha)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi - C^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \mu \square \xi, \nu, \xi) - C^{(\alpha)\beta bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi$$

$$[\tau^{-(\alpha)\beta bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi] (Y^b [i] + Y^c [j] + Z) = [\theta(\alpha) [k] \xi] (D^{(\alpha)\beta bc} [k] \mu, \nu, \xi - D^{(\alpha-1/3)\beta bc} [k] \mu \square \xi, \nu, \xi) - D^{(\alpha)\beta bc} [k] \xi, \mu, \nu, \xi$$

40

が成り立つことを確認する。

検証者は次に、

$$k=m+1, \dots, m+n; \beta=1, \dots, \lambda; b, \xi, \zeta \in \{0, 1\}$$

に関して

$$[s^{(\alpha)}b_{[k]\xi,\xi}]G = [\theta^{(\alpha)}_{[k]\xi}] (A^{(\alpha)}b_{[k]\xi} - A^{(\alpha-1)}b_{[k]\xi} \square \xi) - A^{(\alpha)}b_{[k]\xi,\xi}$$

$$[s^{(\alpha)}b_{[k]\xi,\xi}] (Y^b_{[k]+Z}) = [\theta^{(\alpha)}_{[k]\xi}] (B^{(\alpha)}b_{[k]\xi} - B^{(\alpha-1)}b_{[k]\xi} \square \xi) - B^{(\alpha)}b_{[k]\xi,\xi}$$

$$[t^{(\alpha)}\beta b_{[k]\xi,\xi}]G = [\theta^{(\alpha)}_{[k]\xi}] (C^{(\alpha)}\beta b_{[k]\xi} - C^{(\alpha-1)}\beta b_{[k]\xi} \square \xi) - C^{(\alpha)}\beta b_{[k]\xi,\xi}$$

$$[t^{(\alpha)}\beta b_{[k]\xi,\xi}] (Y^b_{[k]+Z}) = [\theta^{(\alpha)}_{[k]\xi}] (D^{(\alpha)}\beta b_{[k]\xi} - D^{(\alpha-1)}\beta b_{[k]\xi} \square \xi) - D^{(\alpha)}\beta b_{[k]\xi,\xi}$$

10

が成り立つことを確認する。検証者は次に、

$$k=1,\dots,l; b, \xi, \zeta \in [0,1]$$

に関して

$$[s^{+(\alpha)}b_{[k]\xi,\xi}]G = [\theta^{(\alpha)}_{[k]\xi}] (A^{+(\alpha)}b_{[k]\xi} - A^{+(\alpha-1)}b_{[k]\xi} \square \xi) - A^{+(\alpha)}b_{[k]\xi,\xi}$$

20

$$[s^{+(\alpha)}b_{[k]\xi,\xi}] (Y^b_{[k]+Z}) = [\theta^{(\alpha)}_{[k]\xi}] (B^{+(\alpha)}b_{[k]\xi} - B^{+(\alpha-1)}b_{[k]\xi} \square \xi) - B^{+(\alpha)}b_{[k]\xi,\xi}$$

が成り立つことを確認する。

[別記述 F]

証明者(計算者)  $u_\alpha$  は、全ての  $k=1,\dots,m+n$ , 全ての  $b,c \in [0,1]$  に関して、

30

全ての証明者(計算者)  $\{u_\alpha\}_{\alpha=1,\dots,\lambda}$  は、  $z^{(\alpha)} \in_{\mathbb{R}} \mathbb{Z}/q\mathbb{Z}$  を一様無作為に生

成し、  $z^{(\alpha)} = [z^{(\alpha)}]G$  を生成し、全ての  $k=1,\dots,m$ 、全ての  $b,c \in [0,1]$ 、全

ての  $i = 1, \dots, l$  に関して

$$A^{(\lambda)}\alpha bc_{[k]000} = [z^{(\alpha)}]A^{(\lambda)}bc_{[k]000}$$

40

$$C^{(\lambda)}\alpha \beta bc_{[k]000} = [z^{(\alpha)}]C^{(\lambda)}\alpha bc_{[k]000}$$

を生成し、全ての  $k = m+1, \dots, m+n$ 、全ての  $b \in \{0,1\}$ 、全ての  $i = 1, \dots, l$  に関して

$$A'(\lambda) \alpha b_{[k]0} = [z'(\alpha)] A(\lambda) b_{[k]0}$$

$$C'(\lambda) \alpha \beta b_{[k]0} = [z'(\alpha)] C(\lambda) \alpha b_{[k]0}$$

を生成し、全ての  $k = 1, \dots, l$ 、全ての  $b \in \{0, 1\}$  に関して

$$A^\dagger(\lambda) \alpha b_{[k]0} = [z'(\alpha)] A^\dagger(\lambda) b_{[k]0}$$

10

を生成する。

$$S = \{ [ A(\lambda) b_{[k]0}, C(\lambda) \beta b_{[k]0} ]_{k=1, \dots, m; b, c=0, 1; \beta=1, \dots, \lambda},$$

$$[ A(\lambda) b_{[k]0}, C(\lambda) \beta b_{[k]0} ]_{k=m+1, \dots, m+n; b=0, 1; \beta=1, \dots, \lambda},$$

20

$$[ A^\dagger(\lambda) b_{[k]0} ]_{k=1, \dots, l; b=0, 1},$$

$$[ A^\ddagger(\lambda) \alpha b_{[k]0}, C^\ddagger(\lambda) \alpha \beta b_{[k]0} ]_{k=1, \dots, m; b, c=0, 1; \beta=1, \dots, \lambda},$$

$$[ A^\ddagger(\lambda) \alpha b_{[k]0}, C^\ddagger(\lambda) \alpha \beta b_{[k]0} ]_{k=m+1, \dots, m+n; b=0, 1; \beta=1, \dots, \lambda},$$

30

$$[ A^\ddagger(\lambda) \alpha b_{[k]0} ]_{k=1, \dots, l; b=0, 1},$$

$$[ z'(\alpha) ],$$

$$[ A(\lambda) \alpha b_{[k]0}, C(\lambda) \alpha \beta b_{[k]0} ]_{k=1, \dots, m; b, c=0, 1; \beta=1, \dots, \lambda},$$

$$[ A(\lambda) \alpha b_{[k]0}, C(\lambda) \alpha \beta b_{[k]0} ]_{k=m+1, \dots, m+n; b=0, 1; \beta=1, \dots, \lambda},$$

40

$$[ A^\dagger(\lambda) \alpha b_{[k]0} ]_{k=1, \dots, l; b=0, 1} ]$$

を生成し、さらに

$$\theta = \text{Hash}(E, G, S) \bmod q$$

を生成する。さらに

$$z''(\alpha) = z(\alpha)\theta + z'(\alpha) \bmod q$$

を生成する。証明者は、

$$z(\alpha), \{ A^{(\lambda)} \alpha^{bc} [k]_0, C^{(\lambda)} \alpha \beta^{bc} [k]_0 \}_{k=1, \dots, m; b, c=0, 1; \beta=1, \dots, \lambda}$$

$$\{ A^{(\lambda)} \alpha^b [k]_0, C^{(\lambda)} \alpha \beta^b [k]_0 \}_{k=m+1, \dots, m+n; b=0, 1; \beta=1, \dots, \lambda},$$

10

$$\{ A^{\dagger}(\lambda) \alpha^b [k]_0 \}_{k=1, \dots, l; b=0, 1},$$

$$z''(\alpha)$$

を証明とする。上記証明の検証方法は以下の通り。

検証者は、

$$S = \{ \{ A^{(\lambda)} \alpha^{bc} [k]_0, C^{(\lambda)} \alpha \beta^{bc} [k]_0 \}_{k=1, \dots, m; b, c=0, 1; \beta=1, \dots, \lambda},$$

20

$$\{ A^{(\lambda)} \alpha^b [k]_0, C^{(\lambda)} \alpha \beta^b [k]_0 \}_{k=m+1, \dots, m+n; b=0, 1; \beta=1, \dots, \lambda},$$

$$\{ A^{\dagger}(\lambda) \alpha^b [k]_0 \}_{k=1, \dots, l; b=0, 1},$$

$$\{ A^{\#}(\lambda) \alpha^{bc} [k]_0, C^{\#}(\lambda) \alpha \beta^{bc} [k]_0 \}_{k=1, \dots, m; b, c=0, 1; \beta=1, \dots, \lambda},$$

$$\{ A^{\#}(\lambda) \alpha^b [k]_0, C^{\#}(\lambda) \alpha \beta^b [k]_0 \}_{k=m+1, \dots, m+n; b=0, 1; \beta=1, \dots, \lambda},$$

30

$$\{ A^{\dagger\#}(\lambda) \alpha^b [k]_0 \}_{k=1, \dots, l; b=0, 1},$$

$$\{ z'(\alpha) \},$$

$$\{ A^{(\lambda)} \alpha^{bc} [k]_0, C^{(\lambda)} \alpha \beta^{bc} [k]_0 \}_{k=1, \dots, m; b, c=0, 1; \beta=1, \dots, \lambda},$$

40

$$\{ A^{(\lambda)} \alpha^b [k]_0, C^{(\lambda)} \alpha \beta^b [k]_0 \}_{k=m+1, \dots, m+n; b=0, 1; \beta=1, \dots, \lambda},$$

$$\{ A^{\dagger}(\lambda) \alpha^b [k]_0 \}_{k=1, \dots, l; b=0, 1} \}$$

を生成し、さらに

$$\theta = \text{Hash}(E, G, S) \bmod q$$

50

を計算して、

$$[z'(\alpha)]G = z'(\alpha) + [\theta]z(\alpha)$$

全ての

$$k=1, \dots, m, b, c \in [0, 1], \beta=1, \dots, \lambda$$

に関して

$$[z'(\alpha)]A(\lambda)bc_{[k]000} = A(\lambda)\alpha bc_{[k]000} + [\theta]A^\#(\lambda)\alpha bc_{[k]000} \quad 10$$

$$[z'(\alpha)]C(\lambda)\beta bc_{[k]000} = C(\lambda)\alpha \beta bc_{[k]000} + [\theta]C^\#(\lambda)\alpha \beta bc_{[k]000}$$

全ての

$$k=m+1, \dots, m+n, b \in [0, 1], \beta=1, \dots, \lambda$$

に関して

$$[z'(\alpha)]A(\lambda)b_{[k]0} = A(\lambda)\alpha b_{[k]0} + [\theta]A^\#(\lambda)\alpha b_{[k]0} \quad 20$$

$$[z'(\alpha)]C(\lambda)\beta b_{[k]0} = C(\lambda)\alpha \beta b_{[k]0} + [\theta]C^\#(\lambda)\alpha \beta b_{[k]0}$$

全ての  $k=1, \dots, 1, b \in [0, 1]$  に関して

$$[z'(\alpha)]A^\dagger(\lambda)b_{[k]0} = A^\dagger(\lambda)\alpha b_{[k]0} + [\theta]A^{\dagger\#}(\lambda)\alpha b_{[k]0}$$

を確認する。

[別記述 G]

計算者  $u(\alpha)$  は  $z'(\alpha) \in_{\mathbb{R}} \mathbb{Z}/q\mathbb{Z}$  を一様無作為に生成し、全ての  $k=1, \dots, l$  に関

して、

$$A^{\dagger\#}_{[k]} = [z'(\alpha)]A^{\dagger\#} \Gamma_{[k]}_{[k]}$$

を生成する。証明者は、

$$S = \{ \{ A^{\dagger\#} \Gamma_{[k]}_{[k]} \}_{k=1, \dots, l} \}$$

$$\{ A^{\dagger\#}_{[k]} \}_{k=1, \dots, l}$$

$$\{ A^{\dagger}_{[k]} \}_{k=1, \dots, l}$$

を生成して、

10

20

30

40

$$\theta = \text{Hash}(E, G, S) \bmod q$$

を生成する。証明者は

$$z''(\alpha) = \theta z(\alpha) + z'(\alpha) \bmod q$$

を生成する。証明者

$$\{ A^{\dagger k}_{[k]} \}_{k=1, \dots, l}, z''(\alpha)$$

10

を証明とする。上記証明の検証方法は以下の通り。検証者は、

$$S = \{ \{ A^{\dagger b \Gamma k}_{[k]} \}_{k=1, \dots, l} \}$$

$$\{ A^{\dagger k}_{[k]} \}_{k=1, \dots, l}$$

$$\{ A^{\dagger}_{[k]} \}_{k=1, \dots, l}$$

20

を生成して、

$$\theta = \text{Hash}(E, G, S) \bmod q$$

を生成する。検証者は

$$[z''(\alpha)] A^{\dagger b \Gamma k}_{[k]} = A^{\dagger}_{[k]} + [\theta] A^{\dagger k}_{[k]}$$

30

を確認できたら証明を受理する。

#### 【実施例 2】

本発明の第 2 の実施例について、図 1 4 ないし図 1 8 を用いて説明する。

本実施例においては、図 1 4 に示すように計算装置 1 4 0 1 が N 個あり、それぞれ計算装置 1 4 0 3 を備えているものとする。以下ではこの計算機を順番に U 1, . . . , U N と呼ぶことにする。記法の都合上、U N の事を U 0 と書く事にする。

[方式の概略]

[データの流れ]

実施例 2 におけるデータの流れを図 1 6 を参照して説明する。

まず、計算装置 1 4 0 1 の U 1 は DATA 0 0 を計算する。これを「0 周目の計算」とよぶ ( 1 7 0 1 )。

次に「一周目の計算」を行う。

U 1 は DATA 0 0 から DATA 1 1 を計算して、DATA 1 1 を U 2 に送る ( 1 7 1 1 )。

次に U 2 は DATA 1 1 から DATA 1 2 を計算し、DATA 1 2 を U 3 に送る ( 1 7 1 2 )。

以下順にデータを送って行き、U N は DATA 1 N - 1 から DATA 1 N を計算し、DATA 1 N を U 1 に送る ( 1 7 1 0 )。ここまでが一周目の計算である。

次に「二周目の計算」を行う。

U 1 は DATA 1 N から DATA 2 1 を計算して、DATA 2 1 を U 2 に送る ( 1 7 2

50

1)。

次にU<sub>2</sub>はDATA<sub>21</sub>からDATA<sub>2<sup>2</sup></sub>を計算し、DATA<sub>21</sub>をU<sub>3</sub>に送る(1722)。

以下順にデータを送って行き、U<sub>N</sub>はDATA<sub>2<sup>N-1</sup></sub>からDATA<sub>2<sup>N</sup></sub>を計算し、DATA<sub>2N</sub>をU<sub>1</sub>に送る(1720)。ここまでが二周目の計算である。

次に「三周目の計算」を行う。

U<sub>1</sub>はDATA<sub>2N</sub>からDATA<sub>3<sup>1</sup></sub>を計算して、DATA<sub>21</sub>をU<sub>2</sub>に送る(1731)。

以下順にデータを送って行き、U<sub>N</sub>がDATA<sub>3<sup>N-1</sup></sub>からDATA<sub>3N</sub>を計算し終わったところでプロトコルが終了となる。

[各計算装置1401の入出力]

次に各計算装置1401のやり取りするデータの入出力を図14を参照して説明する。各計算装置1401には、回路の情報1404、および回路の部分入力1402が入力される。

ここでは、回路の情報1404が表す回路の入力素子以外の素子のfan-inの数が2である場合に対し説明する。

回路の入力素子wへの入力bwはU<sub>1</sub>、...、U<sub>N</sub>のいずれかが秘密裡に所有しているものとする。U<sub>1</sub>の事をU<sub>N+1</sub>とも書く事にする。

U<sub>1</sub>が秘密裡に所有している入力ビットの組が回路の部分入力1402である。

回路の情報1404が表す回路の入力素子iを、いかなる入力が入ってもbwを出力する素子だと思い直した回路を以下C[1]と表す。

C[1]の全てのゲートのfan-inの数は2である。

素子wの左下、右下のfan-inをそれぞれL(w)、R(w)と書く事にする。

各計算装置1401に回路の情報1404、および回路の部分入力1402が入力されたら、まずU<sub>1</sub>は後で説明する手順に従って0周目の計算を行う。

1周目、2周目、3周目の計算での入出力は同様のデータ構造を持っている。i=1, 2, 3に対し、ユーザU<sub>1</sub>が第i周目の計算でU<sub>1+1</sub>に送信するデータをDATA<sub>i1</sub>と表す事にする。DATA<sub>i-1N</sub>をDATA<sub>i0</sub>とも書く事にする。

また、第0周目の計算でU<sub>1</sub>が行った計算の計算結果をDATA<sub>01</sub>と書く。

DATA<sub>i<sup>1</sup></sub>は、DATA<sub>i<sup>1</sup></sub>=DATA<sub>i<sup>1-1</sup></sub> BODY<sub>i<sup>1</sup></sub> PROOF<sub>i<sup>1</sup></sub> SIG<sub>i<sup>1</sup></sub>という形をしている。

DATA<sub>i1-1</sub>はU<sub>1-1</sub>から送られてきたメッセージ、BODY<sub>i1</sub>はメッセージの本体、PROOF<sub>i1</sub>はBODY<sub>i1</sub>の正当性証明文、SIG<sub>i1</sub>はU<sub>1</sub>のDATA<sub>i1-1</sub> BODY<sub>i1</sub> PROOF<sub>i1</sub>に対する署名。

1周目、2周目、3周目の計算の概略を説明する。

第i周目の計算において、U<sub>1</sub>はまずDATA<sub>i1-1</sub>をU<sub>1-1</sub>から受け取る(1501)。

(一周目のU<sub>1</sub>のみは例外的に自分で作ったデータDATA<sub>01</sub>を使う)。

DATA<sub>i<sup>1-1</sup></sub>を受け取ったら、U<sub>1</sub>は正当性証明文PROOF<sub>11</sub>、...、PROOF<sub>1-11</sub>を全て検証する(1502)。そして次にU<sub>1</sub>は署名文SIG<sub>1<sup>1</sup></sub>、...、SIG<sub>1-11</sub>を全て検証する(1503)。

第1周目の場合で、しかもl=1の場合のみ1504の計算を行う。次にU<sub>1</sub>は乱数生成を行う(1505)。そしてU<sub>1</sub>はその乱数を用いて本計算を行い、BODY<sub>i1</sub>を作成する(1506)。本計算を終えたらU<sub>1</sub>はBODY<sub>i1</sub>の正当性証明文PROOF<sub>i1</sub>を作成する(1507)。そしてU<sub>1</sub>はDATA<sub>i1-1</sub> BODY<sub>i1</sub> PROOF<sub>i1</sub>に対する署名文SIG<sub>i1</sub>を作成する(1508)。

最後にU<sub>1</sub>はDATA<sub>i1</sub>=DATA<sub>i1-1</sub> BODY<sub>i1</sub> PROOF<sub>i1</sub> SIG<sub>i1</sub>をU<sub>1+1</sub>に送信する(1509)。

[記号]

以下に、本明細書で使用する記号の説明を行う。

10

20

30

40

50

[暗号方式 E [ 2 7 ]]

$G [ 1 ]$  を、アーベル群で DDH 問題が難しいもの (例えば有限体上の楕円曲線群) とし、 $G [ 1 ]$  の位数を  $p$  とし、 $G [ 1 ]$  の零元を  $O$  と表す。

を記号とし、以下の記号を定義する。ただし、

$$P[|0|] \in G[1]$$

に対し、 $(P [ | 0 | ], O)$  を略記して単に  $P [ | 0 | ]$  と表し、自然に

$$F_p \subset B[12], G[1] \subset G[12B]$$

10

とみなし、 $G [ 1 2 B ]$  上の和を成分毎の和により定義し、

$$\begin{aligned} W [ 12 ] &= B[12]^\kappa \text{ とし、} \\ G [ 12W ] &= G [ 12B ]^\kappa \text{ とする。} \\ w[2] &\in W[12] \end{aligned}$$

の成分を  $w [ 2 | \quad ]$  と表し、 $W [ 1 2 ]$  上の和と積を成分毎の和と積により定義し、 $G [ 1 2 W ]$  上の和とスカラー倍を成分毎の和とスカラー倍により定義する。

20

- $B[12]=F_p [\eta] / (\eta^2-1)$ ,
- $\phi [24] (1)=1, \phi [24] (0)=\eta$ ,
- $G[12B]=G[1]^2$ ,
- $aP[2]=(a[|0|]P[|0|]+a[|1|]P[|1|], a[|0|]Pa[|1|]+a[|1|]Pa[|0|])$
- $W[12]=B[12]^\kappa$ ,
- $e[|i|]=(0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$  ( $i$  番目のみが 1)
- $\phi [2] : F_p \rightarrow W[12]$  を  $x \rightarrow \sum_{\alpha} \phi [2] (x[|\alpha|]) e[|\alpha|]$
- ただしここで

30

- $P[2]=(P[|0|], P[|1|]), P[23]=(P[3|0|], P[3|1|]) \in G[12B],$   
 $a=a[|0|]+a[|1|]\eta \in B[12], P[2]=$   
 $(P[|0|], P[|1|]) \in G[12B],$
- $\kappa : p$  のビット数,
- $x=x[|k-1|] || \dots || x[|0|],$
- $G[12W]=G[12B]^\kappa,$

暗号方式 E [ 2 7 ] は  $G [ 1 2 W ]$  における、楕円 El Gamal 暗号の類似物である。

秘密鍵空間を  $F_p$ 、公開鍵空間を  $G [ 1 2 W ]^2$ 、平文空間を  $G [ 1 2 W ]$ 、乱数空間を  $W [ 1 2 ]$  とする。

40

鍵生成をするには、 $P = P [ | 0 | ] + P [ | 1 | ]$  で  $P [ | 0 | ], P [ | 1 | ]$   $O$  となるものを任意に選ぶ。

ランダムに  $a \in F_p$  を選び、 $Q=aP$  とする。 $a$  が秘密鍵、 $(P,Q)$  が公開鍵である。平文  $M$  を暗号化するには一様かつランダムに  $r \in B [ 1 2 ]$  を選び、暗号文  $(P [ 3 ], Q [ 3 ]) = (rP, M + rQ)$  を計算する。 $(P [ 3 ], Q [ 3 ])$  を復号するには  $Q [ 3 ] - aP [ 3 ]$  を計算すれば良い。[暗号方式 E [ 2 ], E [ 2 5 ]]

以下を定義する：

- $K[1]=\{ \{ x[|wWh|] \} (w \in C[1], W \in \{L, R\}, h \in \{0, 1\} \text{ を走る}) \mid x[|wWh|] \in F_f$
- $A[12]=\{ \{ a[2|wWijk|] \} ( \{ w \in C[1], W \in \{L, R\}, i, j, k \in \{0, 1\} \} \text{ を走る}) \mid a[$
- $A[125]=\{ \{ A[25|wWijk|i[6]j[6]k[6]] \} ( \{ w \in C[1], W \in \{L, R\}, i, i[6], j, j[6]$   
 $\mid A[25|wWijk|i[6]j[6]k[6]] \in W[12] \}$
- $G[1|K1]=\{ \{ P[|wWh|] \} ( \{ w \in C[1], W \in \{L, R\}, h \in \{0, 1\} \} \text{ を走る}) \mid P[|wWh$
- $G[12|A1]=\{ \{ P[2|wWijk|] \} ( \{ w \in C[1], W \in \{L, R\}, i, j, k \in \{0, 1\} \} ) \mid P[2|wWi,$
- $G[124|A1]=\{ \{ P[24|wWijk|i[6]j[6]k[6]] \}$   
 $( \{ w \in C[1], W \in \{L, R\}, i, j, k, i[6], j[6], k[6] \in \{0, 1\} \} \text{ を走る})$   
 $\mid P[24|wWijk|i[6]j[6]k[6]] \in G[12W],$
- $aA=(aA[11], aA[12])$
- $a[5]A[5]=(a[5]A[511], a[5]A[521])$
- ・ ただしここで

10

- $a \in A[12]$
- $A=(a[11], A[12]) \in G[12|A1]^2$
- $a[5] \in A[125]$
- $A[5]=(A[511], A[521]) \in G[124|A1]^2$

20

$k$  の元  $x$  の  $wWh$  成分を  $x[|wWh|]$  と書く事にし、 $A[12]$  の元  $x[2]$  の  $wWijk$  成分を  $x[|wWijk|]$  と書く事にし、 $A[125]$  の元  $\wedge[25]$  の  $wWijk, i[6], j[6], k[6]$  成分を  $x[|wWijk|i[6]j[6]k[6]]$  と書く事にする。

多重配列の和と積、スカラー倍を、成分毎の和と積により定義する。ただし例外的に、 $A[125]$  の元同士の積、および  $G[124|A1]$  の元の  $A[125]$  の元によるスカラー倍のみは

- $a[25]*b[25]=\sum_{i[7], j[7], k[7]} a[25|wWijk|i[7]j[7]k[7]] b[25|wWi[7]j[7]k[7]|i[6]j[6]k[6]],$
- $a[25]*P[24]=\sum_{i[7], j[7], k[7]} a[25|wWijk|i[7]j[7]k[7]] P[24|wWi[7]j[7]k[7]|i[7]j[7]k[7]]$   
 $(i[7], j[7], k[7] \text{ に関する和})$

30

により定義する。

以下の記号を定義する。

- $E[25] [(Z[2] | s[25])] (M[25])$   
 $=$   
 $\{E[27] [(Z[2] | s[25] | wWijk | i[6] j[6] k[6])] (M[25] | wWijk | i[6] j[6] k[6])\}$
- $E[25] [(Y[2] | s[25])] (M[25])$   
 $=$   
 $E[25] [(s[25] | Z[25])] (M[25])$
- $E[2] [(x[2] | r[2])] (M[2])$   
 $=$   
 $\{E[27] [(x[2] | wWijk | i[6] j[6] k[6]) | r[2] | wWijk | i[6] j[6] k[6])] (M[2] | wWijk | i[6] j[6] k[6])\}$
- $E[2] [(Y[2] | r[2])] (M[2])$   
 $=$   
 $E[2] [(x[2] | r[2])] (M[2])$

10

・ ただしここで

- $M[25] = \{M[25 | wWijk | i[6] j[6] k[6]]\},$   
 $M[25 | wWijk | i[6] j[6] k[6]} \in G[12W]$
- $Z[2] = \{Z[25 | wWijk | i[6] j[6] k[6]]\},$   
 $\{Z[25 | wWijk | i[6] j[6] k[6]]\} \in G[12W]^2$
- $s[25] = \{s[25 | wWijk | i[6] j[6] k[6]]\} \in A[125]$
- $Y[2] = (P[2], r[2]) \in G[12W],$
- $Z[25] = \{Y[2]\} [ | wWijk | i[6] j[6] k[6] ]$
- $M[2] = \{M[2 | wWijk | i[6] j[6] k[6]]\} [ | wWijk | i[6] j[6] k[6] ]$  ( $M[2 | wWijk | i[6] j[6] k[6]} \in G[12W]$ )
- $x[2] = (P[2], Q[2]) = (\{P[2 | wWijk | i[6] j[6] k[6]]\}, \{Q[2 | wWijk | i[6] j[6] k[6]]\})$   
 $(P[2 | wWijk | i[6] j[6] k[6]}, Q[2 | wWijk | i[6] j[6] k[6]}) \in G[12W],$
- $r[2] = \{r[2 | wWijk | i[6] j[6] k[6]]\}, r[2 | wWijk | i[6] j[6] k[6]} \in \{W[12]\}$

20

暗号方式 E [ 2 ]、E [ 2 5 ] をそれぞれ、真理値群環上の多重配列エルガマル暗号、真理値群環上の拡張多重配列エルガマル暗号と呼ぶ事にする。[ その他の記号 ]

- $h[ : | | w | ] ( i j k ) = ( i \square [ | w | ] j ) \circ k$
- $F[25: | | \lambda [ | 1 | ], \lambda [ | 2 | ], \lambda [ | 2 | ] | ] ( x[2] ) =$   
 $\{x[2: | | w h [ | w | ] ] ( i j k ) |$   
 $\delta ( i, i[6] \circ \lambda [ | 1 w | ] ),$   
 $\delta ( j, j[6] \circ \lambda [ | 2 w | ] ),$   
 $\delta ( k, k[6] \circ \lambda [ | 3 w | ] )\}$   
 $(wWijk | i[6] j[6] k[6] \text{ に関する属})。$
- $J[2] ( x[2] ) \in A[12] = J[2] ( x[2] ) = \{x[2 | W(w) i [W] | ]\},$
- $\pi [2] ( a[25] ) = \{ \Sigma a[25 | wWijk | i[6] j[6] k[6] ] [ | i j k | ] \}$   
 $(和は i[6]、j[6]、k[6] \text{ に関する和})$

30

40

ただしここで

- $\lambda[11]=\{\lambda[11w]\}$ 、 $\lambda[12]=\{\lambda[12w]\}$ 、  
 $\lambda[13]=\{\lambda[13w]\}$  : ビットの属。(w ∈ C[1]に関する属)。
- $x[2]=\{x[2|wWh]\}$   $x[2|wWh] \in W[12]$ ,
- 「○」 : ビット毎の排他的論理和。
- 「□[|w|]」 : 素子wで計算する演算子。  
 (ただしwが入力素子の時は  $i \square[|w|] j = 1$  (if  $b_w$  を  $U_1, \dots, U_{l-1}$  のいずれかが持っている)、 $i \square[|w|] j = 0$  (otherwise) )
- $\delta(i, i[6])$  : クロネッカーのデルタ。
- $i[W]=i$  (if  $w=L$ )、 $i[W]=j$  (if  $w=R$ )、
- $a[25]=\{a[25|wWijk|i[6]j[6]k[6]]\} \in A[125]$

10

と定義する。簡単な計算から、次が成立する事が分かる :

- $(a[25]*b[25])c[25]=a[25]*(b[25]*c[25])$ ,
- $(a[25]*b[25])P[2]=a[25]*(b[25]*P[2])$ ,
- $F[25:1|\lambda[3|1|], \lambda[3|2|], \lambda[3|3|]](1)$   
 $*F[25:1|\lambda[11|], \lambda[12|], \lambda[13|]](x[2])$   
 $=$   
 $F[25:1|\lambda[3|1|] \circ \lambda[11|], \lambda[3|2|] \circ \lambda[12|], \lambda[3|3|] \circ \lambda[13|]](x[2])$
- $F[25:1|\lambda[11|], \lambda[12|], \lambda[13|]](x[2])$   
 $*F[25:1|0,0,0](x[23])=F[25|\lambda[11|], \lambda[12|], \lambda[13|]](x[2] \circ x[23])$   
 ただしここで

20

- $a[25], b[25], c[25] \in A[125]$ ,
- $a[2], b[2] \in A[12]$ ,
- $x[2], x[23] \in \kappa$ ,
- $\lambda[11]=\{\lambda[11w]\}$ 、 $\lambda[12]=\{\lambda[12w]\}$   
 $\lambda[13]=\{\lambda[13w]\}$ 、  
 $\lambda[3|1]=\{\lambda[11w]\}$ 、  
 $\lambda[3|2]=\{\lambda[12w]\}$ 、  
 $\lambda[3|3]=\{\lambda[13w]\}$  : ビットの配列
- $l \in \{1, \dots, N\}$

30

[ 第 0 周目の計算の詳細 ]

第 0 周目の計算の詳細を述べる。

U 1 が BODY 1 0 を計算する方法を説明する。

U 1 は以下を計算する。

- $x[:0|wWh]=0,$
- $x[2:0|wWh]$   
 $=$   
 $\phi[2](x[:0|wWh]),$
- $x[:0]$   
 $=$   
 $\{x[:0|wWh]\},$
- $x[2:0]$   
 $=$   
 $\{x[2:0|wWh]\},$  10
- $\lambda[:0]=\{\lambda[:0|w]=\{0\},$   
 $\lambda[L:0]=\{\lambda[:0|L(w)]=\{0\},$   
 $\lambda[R:0]=\{\lambda[:0|R(w)]=\{0\},$
- $r[2:0]=\{r[2:0|wWijk]=\{0\}$  (wWijkに関する属)
- $y[:0]=0,$   
 $r[2:0]=y[:0]P[2](=0), Y[2:0]=(P[2], r[2:0])$
- $s[2:0|S]=\{(s[2:0|S])[\{wWijk\}i[6]j[6]k[6]]\}$   
 $=\{0\}[\{wWijk\}i[6]j[6]k[6]],$
- $s[2:0|T]=\{(s[2:0|T])[\{wWijk\}i[6]j[6]k[6]]\}$   
 $=\{0\}[\{wWijk\}i[6]j[6]k[6]],$  20
- $s[25U:0]=\{(s[25U:0|wWijk\}i[6]j[6]k[6])\}$   
 $=\{0\}[\{wWijk\}i[6]j[6]k[6]],$
- $(S[2:0], T[2:0], U[25:0]) = (E[2][\langle Y[2:0] | s[2:0|S] \rangle])(r[2:0]P[2])$
- $E[2][\langle Y[2:0] | s[2:0|T] \rangle])(r[2:0]q[2:0]),$
- $E[25][\langle Y[2:0] | s[25R:0] \rangle](F[25:1] \lambda[L:0], \lambda[R:0], \lambda[:0]) (x[2:0])P[2])$
- $BODY_1^0 =$   
 $(q[2:0], r[2:0]) || (s[2:0], T[2:0], U[25:0]),$   
 ただしここで
- $w \in \{C[1], W \in \{L, R\}, h \in \{0, 1\}, i, j, k \in \{0, 1\}$  30

[ 第 1 周目の計算の詳細 ]

一周目のマルチパーティ計算を説明する。図 1 5 に則して説明する。

[ データの取得 1 5 0 1 の詳細 ]

各  $U_1$  は  $U_{1-1}$  からデータ  $DATA_{11-1}$  を受け取る。(  $U_1$  のみは、例外的に自分でデータ  $DATA_{11-1} = DATA_{10}$  を計算する )。

[ データ中の証明文の検証 1 5 0 2 の詳細 ]

さて  $U_{1-1}$  から  $DATA_{11-1}$   $BODY_{11-1}$   $PROOF_{11-1}$   $SIG_{11-1}$  が送られてきたら、 $U_1$  は  $PROOF_{1-1}, \dots, PROOF_{1-1-1}$  の正当性を確認する。この正当性の確認についての詳細は後述する。 40

[ データ中の署名文の検証 1 5 0 3 の詳細 ]

$U_1$  は  $SIG_{11}, \dots, SIG_{11-1}$  の正当性を確認する。さらに  $RAND$  のハッシュ値  $P$  を計算し、 $P[2] = (e[|0|] + \dots + e[|k-1|]) (1 + ) P$  を確認する。

[  $U_1$  のみ行う計算 1 5 0 4 の詳細 ]

$U_1$  はまず、乱数  $RAND$  を任意に選び、 $RAND$  のハッシュ値

$P \in G[1]$

とし、 $P[2] = (e[|0|] + \dots + e[|k-1|]) P[2B]$  とし、 $BODY_{1-1} = RAND P[2]$  とし、そして  $BODY_{10}$  を後で説明する手順に従って自 50

分で作成し、さらに  $PROOF10 = SIG10 =$  とし、 $DATA10 = RAND B ODY10 PROOF10 SIG10$ とする。

[乱数生成1505の詳細]

U1はランダムに以下を選ぶ(ただしカッコ内の記述を満たすように選ぶこと) :

- $\{x[\#1|wh|]\} (x[\#1|w[t]0|])=0,$   
 $x[0\#1|w[t]0|]=1,$   
 $x[\#1|wh|] \in K[1],$  各  $x[\#1|wh|]$  の最上位ビットは1)。
- $\{x[|wWh|], x[|wWh|] \in \{0, 1\} (x[\#1|wLh|] \circ x[\#1|wRh|]=x[\#1|wh|])$   
 $\{w \in C[1], W \in \{L, R\}, h \in \{0, 1\}\}$
- $r[2]=\{r[2|wWijk|]\} \in A[12],$
- $r[2|wWijk|] \in F_p^{\kappa} \subset B[12]^{\kappa} = W[12],$
- $s[2|S|]=\{(s[2|S|]) [ |wWijk| ]\} \in A[12],$
- $s[2|T|]=\{(s[2|T|]) [ |wWijk| ]\} \in A[12],$
- $s[25U]=\{s[25U|wWijk|i[6]j[6]k[6]|\} \in A[125].$
- $\lambda[\#1]=\{\lambda[\#1|w|]\}$  (ビットの属,  $\lambda[|w[t]|]=0$ )
- $y[\#1] \in F_p \subset \kappa$

10

・ W t : 出力素子

入力素子 w に対し、形式的に  $x[\#1|L(w)0|]=x[\#1|R(w)1|]=$  20  
0 と定義する。

以下の記号を定義する。

●  $x[:1|wWh|]=\bigcirc x[\# \gamma |wWh|],$  ( $\gamma \leq 1$  の範囲の排他的論理和  
を取る)。

- $x[:1]=\{x[:1|wWh|]\},$
- $x[2\#1|wWh|]=\phi[2](x[\#1|wWh|]),$
- $x[2\#1]=\{x[2\#1|wWh|]\},$
- $x[2:1|wWh|]=\phi[2:1](x[|wWh|]),$
- $x[2:1]=\{x[2:1|wWh|]\},$

30

- $\lambda[\#1]=\{\lambda[\#1|w|]\},$   
 $\lambda[L\#1]=\{\lambda[\#1|L(w)|]\},$   
 $\lambda[R\#1]=\{\lambda[\#1|R(w)|]\},$   
 $\lambda[:1|w|]=\sum \lambda[\# \gamma |w|],$  ( $\gamma \leq 1$  の範囲の和を取る)  
 $\lambda[:1]=\{\lambda[:1|w|]\},$   
 $\lambda[L:1]=\{\lambda[:1|L(w)|]\},$   
 $\lambda[R:1]=\{\lambda[:1|R(w)|]\},$

40

- $Y[2:1]=\{P[2], y[:1]P[2]\},$   
 $y[:1]=\sum y[\#1],$  ( $\gamma \leq 1$  の範囲の和を取る)

提案方式に関し、次の事実が言える。ユーザ達がプロトコルにしたがっている場合、各 U1 の送るデータ BODY 11 は以下を満たす。

- BODY11 = (Q[2:l], r[2:l]) || (s[2:l], T[2:l], U[25:l]),
- (Q[2:l], r[2:l]) = J[2](x[2:l])P[2], y[:l]P[2]),
- (s[2:l], T[2:l], U[25:l]) = (E[2]((Y[2:l]|s[2][S:l]))(r[2:l]P[2]),  
E[2]((Y[2:l]|s[2][T:l]))(r[2:l]Q[2:l]),  
E[25]((Y[2:l]|s[25U:l]))(F[25:l]λ[L:l], λ[R:l], λ[:l]))(x[2:l])P[2])

ただしここで

10

- $s[2:l|S]$   
=  $\sum s[2\#\gamma|S]$  ( $\gamma \leq l$ の範囲の和を取る);

- $s[2:l|T]$   
=  $\sum s[2\#\gamma|T]$ ,

- $s[25U:l] = [235U:l] + s[25U\#l],$   
 $s[235U:l]$   
=  $F[25:l|\lambda[L\#l], \lambda[R\#l], \lambda[\#l]](1)$   
\*  $s[25U:l-1]$   
\*  $F[25:l|0, 0, 0](x[2\#l]),$

20

[本計算1506の詳細]

一周目のマルチパーティ計算の本計算1506を図17に則して説明する。

U1がBODY11を計算する方法を説明する。

[再暗号用の公開鍵の計算1701]

U1はまず、

30

- $Q[2:l] = J[2]x[2\#l]Q[2:l-1]$
- $r[2:l] = y[\#l]P[2] + r[2:l-1]$ を計算する。

[データの変換1702]

- $S[23:l] = r[2\#l]s[2:l-1]$
- $T[23:l] = r[2\#l]J[2](x[2\#l])T[2:l-1]$
- $U[235:l] = F[25:l|\lambda[L\#l], \lambda[R\#l], \lambda[\#l]](1) * U[25:l-1] * F[25:l|0, 0, 0](x[2\#l])$

40

を計算する。

なお、この時次が言える：

- $Q[2:i] = J[2](x[2:i])P[2]$ 、
- $r[2:i] = y[:i]P[2]$ 、
- $S[23:i] = E[2]((Y[2:i-1]||s[2:i-1]||S[i]))(r[2:i]P[2])$ 、
- $T[23:i] = E[2]((Y[2:i-1]||s[2:i-1]||T[i]))(r[2:i]Q[2:i])$ 、
- $U[235:i] = E[25]((Y[2:i-1]||s[235U:i]))(F[25:i]||\lambda[L:i], \lambda[R:i], \lambda[:i])(x[2:i]P[2])$ 。

ただしここで

$$\bullet s[235U:i] = F[25:i]||\lambda[L\#i], \lambda[R\#i], \lambda[\#i]](1)$$

$$*s[25U:i-1] * F[25:i]||0, 0, 0]](x[2\#i])$$

[ 再暗号化 - 秘密鍵の変換 1 7 0 3、再暗号化 - 乱数の変換 1 7 0 4、正当性証明文の作成 1 5 0 7、署名文の作成 1 5 0 8、データの送信 1 5 0 9 ]

最後に U 1 は以下を計算する。(かっこ内は図中の番号)。

•(1703) $s[233:l]=S[23:l|1], S[23:l|2]+y[\#]s[2:l|1]),$

$T[233:l]=T[23:l|1], T[23:l|2]+y[\#]T[2:l|1]),$

$T[2335:l]=(U[235:l|1], U[235:l|2]+y[\#]U[25:l|1]),$

•(1704)

$s[2:l]=s[233:l]+E[2][(Y[2:l]s[2\#1|S])](O),$

$T[2:l]=T[233:l]+E[2][(Y[2:l]s[2\#1|T])](O)$

$U[235:l]=(U[235:l|1], U[235:l|2]),$

$U[25:l]=T[2335:l]+E[25][(Y[2:l]s[25U\#1])](O),$

$(s[2:l], T[2:l], U[25:l])$

$=(E[2][(Y[2:l]s[2:l|S])](r[2:l]P[2]),$

$E[2][(Y[2:l]s[2:l|T])](r[2:l]Q[2:l]),$

$E[25][(Y[2:l]s[25U:l])]$

$(F[25:l][(\lambda[L:l], \lambda[R:l], \lambda[l])](x[2:l]P[2]),$

•(1507)

•(1508)

・ BODY1I=s[2:l]・ DATA1I-1 || BODY1I-1 || PROOF1I-1 の署名

SIG1I を作成。

•(1509)DATA1I=DATA1I-1 || BODY1I || PROOF1I || SIG1IDATA1I を UI+1

ただしここで

•  $S[23:l]=E[2][(Y[2:l-1]s[2:l-1|S])](r[2:l]P[2]),$

•  $T[23:l]=E[2][(Y[2:l-1]s[2:l-1|T])](r[2:l]P[2]),$

•  $U[235:l]=E[25][(Y[2:l-1]s[25U:l-1])](r[25:l]P[2]),$

•  $S[23:l]=(S[23:l|1], S[23:l|2]),$

•  $T[23:l]=(T[23:l|1], T[23:l|2]),$

•  $T[23:l]=(T[23:l|1], T[23:l|2]),$

正当性証明文の作成 1 5 0 7 の詳細は長いので説明を後にまわす。

DATA1I = ( Q [ 2 : 1 ] , r [ 2 : 1 ] ) ( s [ 2 : 1 ] , T [ 2 : 1 ] , U [ 2 5 : 1 ] ) を UI + 1 に送る。

なお、この時次が言える：

10

20

30

40

- $S[233:l] = E[2][(Y[2:l][s[2:l-1|S]])](r[2:l]P[2])$ 、
- $s[2:l] = E[2][(Y[2:l][s[2:l|S]])](r[2:l]P[2])$ 。 [第2周目の計算の詳細]

第二周目の計算の詳細を図15に則して説明する。

[データの取得1501の詳細]

各U1はU1-1からデータDATA21-1 = DATA21-2 BODY21-1 PROOF21-1 SIG21-1を受け取る。

[データ中の証明文の検証1502、データ中の署名文の検証1503、U1のみ行う計算1504、乱数生成1505の詳細、Fp上の暗号の算出1801]

10

以下の計算を行う。

- (1502)PROOF21 || ... || PROOF21-1 の正当性検証(詳細は後述)。
- (1503)SIG21 || ... || SIG21-1 の正当性検証
- (1504)何もしない
- (1505)何もしない

[本計算1506の詳細]

第二周目の計算の本計算1506の詳細を図18に則して説明する。

20

[Fp上の暗号の算出1801]

この節では以後添字「:N」を省略する。

U1は以下の計算をする:

- $s[2U] = \pi[2](s[25U])$ ,
- $m[2S] = r[2]$ ,
- $m[2T] = r[2]J[2](x[2])$ ,
- $m[2U] = F[25|\lambda[L], \lambda[R], \lambda](x[2])$ ,
- $U[2] = \pi[2](U[25])$

30

- $(s[2], T[2], U[2])$   
 $= E[2][(Y[2][s[2|S]])](m[2S]P[2])$ ,  
 $E[2][(Y[2][s[2|T]])](m[2T]P[2])$ ,  
 $E[2][(Y[2][s[2|U]])](m[2U]P[2])$

ただしここで

40

- $X = \{(P, x[|wh|]P)\}$ 、 $Y = \{(P, yP)\}$ ,
- $E[1][[(r[X])(A)] = \{E[7][[(r[|wWijk|]X)](A[|wWijk|]P)\}$
- E[7]: 楕円 ElGamal 暗号方式の暗号化関数。

さらに以下の計算をする。

- $(s[24V|wWijk]) = \sum s[2V|\alpha wWijk], (\alpha \text{ に関する和を取る})$
- $(m[24V|wWijk]) = \sum 2^\alpha m[2V] [|\alpha wWijk|], (\alpha \text{ に関する和を取る})$
- $(s[24V|wWijk]P[2B]) = \sum 2^\alpha s[2V|\alpha wWijk]P[2], (\alpha \text{ に関する和を取る})$
- $s[24V]P[2B] = (s[4V|0, wWijk]P, s[4V|1, wWijk]P),$
- $(m[24V|wWijk] + (s[24V|wWijk]y)P[2B])$   
 $=$   
 $\sum 2^\alpha m[2V|\alpha wWijk] + s[2V|\alpha wWijk]y)P[2B] (\alpha \text{ に関する和を取る})$

10

ただしここで

- $(s[2V|wWijk])$   
 $=$   
 $\sum s[2V|\alpha wWijk]e[\alpha] (\alpha \text{ に関する和を取る})$
- $(s[24V|wWijk]) = ((s[V|0, wWijk], (s[V]) [|\alpha, wWijk|]))$
- $(m[2V|wWijk]) = m[2V|wWijk]$   
 $=$   
 $\sum m[2V|\alpha |wWijk|]e[|\alpha|], (\alpha \text{ に関する和を取る})$
- $m[24V|wWijk] = (m[4V|0, wWijk], m[4V|1, wWijk]),$
- $P[2]$

20

- $=$   
 $\sum e[|\alpha|]P[2B] (\alpha \text{ に関する和を取る})$
- $P[2B] = (P, P), P \in \{G[1],$
- $V[2]$

$$=$$

$$E[2] [(Y[2] | s[2V]) (r[2]P[2])$$

$$=$$

$$(s[2V]P[2], m[2V]P[2] + s[2V]r[2]),$$

30

- $s[2V|wWijk]P[2]$   
 $=$   
 $\sum (s[2V|\alpha |wWijk|]e[|\alpha|]P[2B], (\alpha \text{ に関する和を取る})$
- $(m[2V|wWijk] + s[2V|wWijk] \cdot y)P[2B] \in W[12]$   
 $=$   
 $\sum ((m[2V]) [|\alpha|]) [|\alpha wWijk|] + s[2V|\alpha |wWijk|]y)P[2B]e[|\alpha|].$   
 $(\alpha \text{ に関する和を取る})$
- $(m[24V|wWijk] + s[24V|wWijk]y)P[2B]$   
 $=$   
 $(m[4V|0, wWijk] + s[V|0, wWijk]y)P,$   
 $(m[4V|1, wWijk] + s[V|0, wWijk]y)P$

40

よってU1は以下を得る事ができる：

- $s[V|0, wWijk]P, s[V|1, wWijk]P,$
- $m[4V|0, wWijk] + s[V|0, wWijk]y)P,$

$m[4V|1, wWijk] + s[V|0, wWijk]y)P,$

さらに以下を計算する。

•  $R=yP, Y=(P,R)$

•  $(s[V|0, wWijk])P,$

$(m[4V|0, wWijk] + s[V|0, wWijk]y)P$

$=E[(s[V|0, wWijk]|Y)](m[4V|0, wWijk]P),$

10

•  $(S, T+U)$

$=(E[3][(s[4S0], s[4T0] + s[4U0]|Y)], E[1][(r[40]|J(X))](F[\lambda[L], \lambda[R], \lambda](x))$

•  $\{(\Theta[wWijk], \Theta'[wWijk])\}$

$=E[3][(s[4S0], s[4T0] + s[4U0]|Y)], E[1][(r[40]|J(X))](F[\lambda[L], \lambda[R], \lambda](x))$

•  $\Theta[\&0] = \{(\Theta[wWij0], \Theta'[wWij0])\}$

•  $R[\&0] = R0$

20

ただしここで

•  $r[2] = R[0] + R[1]\eta$

[ [ & 1 ] の計算 1 8 0 2 , 正当性証明文の作成 1 5 0 7 の詳細 , 署名文の作成 1 5 0 8 の詳細 , データの送信 1 5 0 9 の詳細 ]

さらに以下の計算を行う :

• (1802)

•  $\Theta[\&1] = \Theta[\&1-1] - (\Theta[0][\&1-1], \Theta[1][\&1-1] - y[\&1]\Theta[0][\&1-1]),$

•  $BODY2[\&1] = \Theta[\&1].$

30

ただしここで

•  $BODY2[\&1-1] = \Theta[\&1-1],$

•  $\Theta[\&1-1] = (\Theta[\&1-1][0], \Theta[\&1-1][1])$

• (1508)

• (1803)

•  $BODY2[\&1] = s[2:\&1]$

40

•  $SIG2[\&1] : DATA2[\&1-1] || BODY2[\&1] || PROOF2[\&1]$  への署名

そして  $DATA2[\&1] = DATA2[\&1-1] || BODY2[\&1] || PROOF2[\&1] || SIG2[\&1]$  を  $UI+1$  に送信する (1509)。

[ 第 3 周目の計算の詳細 ]

3 周目の計算の詳細を図 1 5 に則して説明する。

$U_{1-1}$  から  $DATA_{3-1-1} = DATA_{3-1-2} || BODY_{3-1-1} || PROOF_{3-1-1} || SIG_{3-1-1}$  が送られてきたら (1501)、まず  $PROOF_{3-1-1}$ 、...、 $PROOF_{3-1-1-1}$ 、 $SIG_{3-1-1}$ 、...、 $SIG_{3-1-1-1}$  の正当性を確認する (1502, 1503

50

)。(1504)，(1505)は第三周目の計算ではない。BODY31 = とし(1506)、PROOF31 = とし(1507)、そしてDATA31 - 1 BODY31 PROOF31に対する署名SIG31を作成し(1508)、DATA31 = DATA31 - 1 BODY31 PROOF31 SIG31とし、DATA31をU1に送る(1509)。

[C[1]]({b[|w|]})を求める方法1405]

C[1]({b[|w|]})を求める方法を説明する。

まず入力素子wに対してx[#1|L(w)0|] = x[#1|R(w)1|] = 0であるので、

{E[1]({X[|W(w)|]μ[|L(w)|]})x[|wWh[3](ij0)|]}を全て解き、Xx[|wWh[3](ij0)|] = x[|wWμ[w]|]を求め、x[3|w|] = x[|wμ[w]|] = x[|wLμ[w]|] ∘ x[|wRμ[w]|]を計算し、μ[w] = h[3](ij0)とする。

10

さて、下からu - 1段目までの各素子wに対して、x[|μ[|w|]|]が求まっているとする。

以下の計算をしてu段目のx[|μ[|w|]|]を求める。

- E[1]({X[|L(w)|]μ[|L(w)|]})

- (x[|wWh[3](μ[|L(w)|]j0)|]),

20

- E[1]({X[|R(w)|]μ[|R(w)|]})

- (x[|wWh[3](iμ[|R(w)|]0)|]) (i,j=0,1)

をx[|W(w)|μ[|W(w)|]|]を使って解く。

- x[|wh[3]μ[|L(w)|]μ[|R(w)0|]|] =

- ∘ x[|wWh[3]μL(w)μ[|R(w)0|]|]

(Wに関する排他的論理和)

ただしここで

30

- h[3](ijk) = h[|w|]((i ∘ λ[|L(w)|]) (j ∘ λ[|R(w)|]) (k ∘ λ[|w|]))

- μ[w] = b[|w|] ∘ λ[|w|]とし、

- b[|w|] : 素子wの出力

- x[3|w|] = x[|wμ[w]|]

最終的に x[|μ[|w[t]|]|] = μ[|w[t]|] = b[|w[t]|] = C[1]({b[|w|]})を出力。

40

[一周目の計算の正当性証明]

[一周目の計算の正当性証明の作成1507の詳細]

以下の記号を定義する：

- $A[12|F_p] = \{a[2|w|ijk] \mid a[2|w|ijk] \in F_p\}$ ,
- $F[25:1|a[10]|b[10]|c[10]|a[11]|b[11]|c[11]](u[2]) \in A[12]$  を  
 $F[25:1|abc|a[16]|b[16]|c[16]](u[2])$   
 $=$   
 $\{x[2|h[:1]|wa[1|0|6]|b[1|0|6]|c[1|0|6]](ijk)\}$
- ・ ただしここで

- $w$ : 素子
- $z[2] \in K[12]$ ,
- $a[2] \in A[12]$ ,
- $a[25] \in A[125]$ ,
- $a[10], a[11], b[10], b[11], c[10], c[11] \in F_p$ ,
- $u[2] \in K[12]$ ,

10

この節では、簡単の為添字「: 1 - 1」を省略する。

以下の方法で知識を証明する。

まず乱数をハッシュ関数に入れて

$$P[6] \in G[1]$$

20

を作る。そして以下を計算する。

- $P[26B] = (1 + \eta)P$ ,
- $P[26] = \sum P[26B]e[|\alpha|]$ , ( $\alpha$ に関する和を取る)
- $NOT(\lambda) = \{NOT(\lambda[|w|])\}$

U1 は以下の手順で PROOF 11 を作成する。ランダムかつ一様に以下のデータを選ぶ。

$$x[26\#1] \in \alpha,$$

$$\rho[26\#1|S[23]] \in A[12]^2,$$

$$\rho[26\#1|S[233]|2] \in A[12],$$

$$\rho[26T[2\&1]\#1] \in A[12]^2,$$

$$\rho[26T[233]\#1] \in A[12]^2,$$

$$\rho[26T[233]\#1|2] \in A[12],$$

$$\rho[246\#1|T[233]|2] \in A[12]^2,$$

$$\rho[256\#1|U[25\&1]] \in A[125]^2,$$

$$\rho[256\#1|\lambda] \in A[125],$$

$$\rho[256\#1|U[25\&2]] \in A[125],$$

$$\rho[256\#1|U[25\&3]] \in A[125],$$

$$\rho[256\#1|U[235:1]] \in A[125]$$

$$\rho[256\#1|T[2335:1]|2] \in A[12].$$

そして以下を計算する。

$$\bullet C[2x[2]\#1|[awWh]] = x[2\#1|awWh]P[2B] + (x[26\#1|awWh]P[26B], C[2x[2]\#1] = \{\sum e[\alpha] C[2x[2]\#1|[awWh]]\}[wWh], (\alpha \text{ に関する和を取る})$$

$$\bullet C[2\#1|S[23]] = S[23:1] + \rho[26S[23]\#1]P[26], \tau[S[23]\#1] = \rho[26S[23]\#1],$$

•  $C[2S[23]\#1] = (C[2S[23]\#1|1], (C[2S[23]\#1]|2])$  を  $(C[2S[23]\#1|1], C[2S[23]\#1|2])$  と書く。

$$C[y, C[2S[23]\#1|1]]$$

=

$$yC[2S[23]\#1|1] + \rho[26S[233]\#1|2]P[26][A[12]],$$

$$C[2S[233]\#1] = (C[2S[23]\#1|1], C[2S[233]\#1|2]),$$

$$C[2S[233]\#1|2] = C[2S[23]\#1|2] + C[2y, C[2S[23]\#1|1]],$$

10

20

30

40

$$\tau[S[233]\#i] = (\tau[S[23]\#i|1]),$$

$$\tau[S[23]\#i|2] + y\tau[S[23]\#i|1] + \rho[26S[233]\#i]).$$

ただしここで  $(\tau[S[23]\#i|1], \tau[S[23]\#i|2]) = (\tau[S[23]\#i])$ 。

$$\bullet C[2T[2\&1]\#i] = T[2\&1:i] + \rho[26T[2\&1]\#i]P[26] \text{ を } \tau[T[2\&1]\#i] = \rho[26T[2\&1]\#i],$$

$$\bullet C[2T[233]\#i] = T[233:i] + \rho[26T[233]\#i]P[26], \tau[T[233]\#i] = \rho[26T[233]\#i],$$

•  $C[2T[23:i]\#i] = (C[2T[23:i]\#i|1], C[2T[23:i]\#i|2])$  を  $(C[2T[23:i]\#i|1], C[2T[23:i]\#i|2])$  と書く。

$$C[y, C[2T[23:i]\#i|1]] = yC[2T[23:i]\#i|1] + \rho[26T[233]\#i|2]P[26A[12]],$$

$$C[2T[233]\#i] = (C[2T[23:i]\#i|1], C[2T[233]\#i|2]),$$

$$C[2T[233]\#i|2] = C[2T[23:i]\#i|2] + C[2y, C[2T[23:i]\#i|1]],$$

$$\tau[T[233]\#i] = (\tau[T[23:i]\#i|1]),$$

$$\tau[T[23:i]\#i|2] + y\tau[T[23:i]\#i|1] + \rho[26T[233]\#i]).$$

ただしここで  $(\tau[T[23:i]\#i|1], \tau[T[23:i]\#i|2]) = \tau[T[23:i]\#i]$ 。

$$\bullet K[2y, C[2T[233]\#i|1]] = y[4\#i]C[2T[23:i]] + \rho[246T[233]\#i|1]P[26],$$

$$\bullet c[25U[25\&1]\#i] = U[25\&1:i] + \rho[256\#i|U[25\&1]]P[26], \tau[U[25\&1]\#i] = \rho[256\#i|U[25\&1]].$$

$$\bullet C[2\lambda\#i] = \lambda\#iP[2] + \rho[256\#i|\lambda]P,$$

$$\bullet \rho[256\text{NOT}(\lambda)\#i] = -\rho[256\lambda\#i], C[2\text{NOT}(\lambda)\#i] = P[2] - C[2\lambda\#i],$$

$$\bullet C[2U[25\&2]\#i] = F[25:i|\lambda[L]\{00|\text{NOT}(\lambda)[L]00\}(u[2])C[2U[25\&1]\#i] + \rho[256\#i|U[25\&2]]P[26],$$

ただしここで  $\text{NOT}(\lambda)[L] = \{\text{NOT}(\lambda)[L(w)]\}$ 。

$$\tau[U[25\&2]\#i] = F[25:i|\lambda[L]\{00|\text{NOT}(\lambda)[L]00\}(u[2])\tau[U[25\&1]\#i] + \rho[256\#i|U[25\&2]]],$$

$$\bullet C[2U[25\&3]\#i] = F[25:i|0\lambda[R]0|0\text{NOT}(\lambda)[R]0\}(u[2])C[2U[25\&2]\#i] + \rho[256U[25\&3]\#i]P[26],$$

ただしここで

$$\text{NOT}(\lambda)[R] = \{\text{NOT}(\lambda)[R|R(w)]\}.$$

$$\tau[U[25\&3]\#i] = F[25:i|0\lambda[R]0|0\text{NOT}(\lambda)[R]0\}(u[2])\tau[U[25\&2]\#i] + \rho[256U[25\&3]\#i].$$

$$\bullet C[2U[235:i]\#i] = F[25:i|00\lambda|00\text{NOT}(\lambda)](u[2])C[2U[25\&3]\#i],$$

$$\tau[U[235:i]\#i] = F[25:i|00\lambda|00\text{NOT}(\lambda)](u[2])\tau[U[25\&3]\#i],$$

$$\bullet C[2U[235:i]\#i] = ((C[2U[235:i]\#i])[1], (C[2U[235:i]\#i])[2]) \text{ を}$$

10

20

30

40

$(C[2U[235:l] \#|1|], C[2U[235:l] \#|2|])$ と書く。

$C[y, C[2U[235:l] \#|1|]] = yC[2U[235:l] \#|1|] + \rho[256 \#|T[2335:l] \#|2|]P[26A[12]],$

$C[2T[2335:l] \#|1|] = (C[2U[235:l] \#|1|], C[2T[2335:l] \#|2|]),$

$C[2T[2335:l] \#|2|] = C[2U[235:l] \#|2|] + C[y, C[2U[235:l] \#|1|]],$

$\tau[T[2335:l] \#|1|] = (\tau[U[235:l] \#|1|]),$

$\tau[U[235:l] \#|2|] + y\tau[U[235:l] \#|1|] + \rho[256T[2335:l] \#|1|],$

10

ただしここで  $(\tau[U[235:l] \#|1|], \tau[U[235:l] \#|2|]) = \tau[U[235:l] \#|1|]$ 。

さらに以下の計算をする。

●  $x[2|\alpha wWh|]P[2B]=1$ の時。

●

各  $\alpha wWh$  に対し、

まずランダムに  $x[246\&1|\alpha wWh|] \in B[1]$  を選

び、  $K[2\&1|\alpha wWh|] =$

$x[246\&1|\alpha wWh|]P[26B]$

を計算。

● ランダムに

$x[29\&\eta|\alpha wWh|],$

$c[2\&\eta|\alpha wWh|] \in B[1]$  を選び、

$K[2\&\eta|\alpha wWh|]$

=

$x[29\&\eta|\alpha wWh|]P[26]$

$-c[2\&\eta|\alpha wWh|](C[2x[2]|\alpha wWh|] - \eta P[2B])$  を

計算する。

20

30

●  $x[2|\alpha wWh|]P[2B]=\eta$ の時。

- 各  $\alpha wWh$  に対し、  
 まずランダムに  $x[246\&\eta | \alpha wWh] \in B[1]$  を選  
 び、  $K[2\&\eta | \alpha wWh] =$   
 $x[246\&\eta | \alpha wWh] P[26B]$  を計算する。
- ランダムに  
 $x[29\&1 | \alpha wWh]$ ,  $c[2\&1 | \alpha wWh]$   
 $\in B[1]$  を選び、  
 $K[2\&1 | \alpha wWh] = x[29\&1 | \alpha wWh] P[26]$   
 $- c[2\&1 | \alpha wWh] (C[2x[2] | \alpha wWh] - P[2B])$  を  
 計算し、  
 $(K[2\&1 | \alpha wWh])$ ,  
 $(K[2\&\eta | \alpha wWh])$  を計算する。

さらに以下のデータを一様かつランダムに選ぶ。

$$x[24\#1], x[246\#1] \in A[12],$$

$$y[4\#1] \in F_p,$$

$$r[24\#1] \in A[12F_p],$$

$$\rho[246S[23]\#1] \in A[12]^2,$$

$$\rho[246S[233]\#1|2] \in A[12]^2, \quad 10$$

$$s[24S\#1] \in A[125], \tau[4S[233]\#1] \in A[125]^2,$$

$$r[24\#1] \in A[12F_p],$$

$$\rho[246T[2\&1]\#1] \in A[12]^2,$$

$$\rho[246T[233]\#1] \in A[12]^2, \quad 20$$

$$s[24T\#1] \in A[125], \tau[4T[233]\#1] \in A[125]^2,$$

$$\rho[2456U[25\&1]\#1] \\ \in A[125]^2,$$

$$\rho[2456\lambda\#1] \in A[125], \\ \lambda[4\#1] \in F_p,$$

$$\text{NOT}(\lambda)[4\#1], \quad 30$$

=

$$\{\text{NOT}(\lambda)[4\#1|w]\},$$

$$\text{NOT}(\lambda)[\#1|w]$$

$$\in F_p,$$

$$\rho[2456U[25\&2]\#1] \in A[125],$$

$$\rho[2456T[2335:1]\#1|2] \in A[12]^2, \quad 40$$

$$s[245U\#1] \in A[125], \tau[4T[2335:1]\#1] \in A[125]^2,$$

そして以下を計算する。

$$\bullet K[2x[2]\#1] = x[24\#1]P[2] + x[246\#1]P[26],$$

$$\bullet K[2J[2](x), Q[2]\#1] = J[2](x[24])Q[2],$$

$$K[2y\#1]a=y[4\#1]P \in F_p \subset B[1],$$

- $K[2r[2],s[2]\#1]=r[24\#1]s[2]+\rho[246S[23]\#1]P[26],$
- $K[2y,C[2S[233]\#1|1]]=y[4\#1]C[2S[23]]+\rho[246S[233]\#1|1]P[26],$
- $K[2s[24S]\#1]=s[24S\#1]Y[2]-\tau[4S[233]\#1]P[26],$
- $K[2r[2],T[2]\#1]=r[24\#1]T[2]+\rho[246T[2\&1]\#1]P[26],$
- $K[2J[2](x[2]),T[2\&1]\#1]=J[2](x[24\#1])T[2\&1]+\rho[246T[233]\#1]P[26],$
- $K[2s[24T]\#1]=s[24T\#1]Y[2]-\tau[4T[233]\#1]P[26],$
- $K[25U[25\&1]\#1]=U[25:l-1]*F[25:l|0,0,0](x[24\#1])+\rho[2456U[25\&1]\#1]P[26],$
- $K[2\lambda,P[2]\#1]=\lambda[4\#1]P[2]+\rho[2456\lambda\#1]P[26],K[2\lambda,C[2\lambda]\#1]=\lambda[4\#1]C[2\lambda\#1]+\rho[2456\lambda\#1]P[26],$
- $\lambda[4L\#1]=\{\lambda[4\#1|L(w)]\},NOT(\lambda)[4L\#1]=\{NOT(\lambda)[4\#1|L(w)]\},K[2U[25\&2]\#1]=F[25:l|\lambda[4L]00|NOT(\lambda)[4L]00](1)*U[25\&1]+\rho[2456U[25\&2]\#1]P[26],$
- $\lambda[4R\#1]=\{\lambda[4\#1|R(w)]\},NOT(\lambda)[4R\#1]=\{NOT(\lambda)[4R(w)\#1]\},K[2U[25\&3]\#1]=F[25:l|0\lambda[4R]0|0NOT(\lambda)[4R]0](1)*U[25\&2]+\rho[2456U[25\&3]\#1]P[26],$
- $\lambda[4R\#1]=\{\lambda[4R(w)\#1]\},NOT(\lambda)[4R\#1]=\{NOT(\lambda)[4R(w)\#1]\},K[2U[235:l]\#1]=F[25:l|00\lambda[4]00|0NOT(\lambda)[4]](1)*U[25\&3],$
- $K[2y,C[2T[2335:l]\#1|1]]=y[4\#1]C[2U[235:l]]+\rho[2456T[2335:l]\#1|1]P[26],$
- $K[2s[245U]\#1]=s[245U\#1]Y[2]-\tau[4T[2335:l]\#1]P[26],$

10

20

30

さらに以下を計算する。

さらに

$c[\#1]=Hash(DATA1l-1,BODY1l,C[2x[2]\#1],C[2S[23]\#1],(C[2S[23]\#1|1]),C[2S[23]\#1|2]),$   
 $C[y,C[2S[23]\#1|1]),C[2T[2\&1]\#1],C[2T[233]\#1],(C[2T[23:l]\#1|1]),C[2T[23:l]\#1|2]),C[2T[233]\#1],K[2s[24T]\#1]=s[24T\#1]Y[2]c[25U[25\&1]\#1],C[2\lambda\#1],C[2NOT(\lambda)\#1],C[2U[25\&2]\#1],C[2U[25\&3]\#1],C[2U[235:l]\#1],(C[2U[235:l]\#1|1]),C[2U[235:l]\#1|2]),C[y,C[2U[235:l]\#1|1]),C[2T[2335:l]\#1|2]),K[2\&1|awWh],K[2\&n|awWh],K[2x[2]\#1],K[2J[2](x),Q[2]\#1],$

$K[2y\#1],K[2r[2],s[2]\#1],K[2y,C[2S[233]\#1|1]),K[2s[24S]\#1],K[2r[2],T[2]\#1],K[2J[2](x[2]),T[2\&1]\#1],K[25U[25\&1]\#1],K[2\lambda,P[2]\#1],K[2\lambda,C[2\lambda]\#1],K[2U[25\&2]\#1],K[2U[25\&3]\#1],K[2U[235:l]\#1],K[2y,C[2T[2335:l]\#1|1]),K[2s[245U]\#1],)$ を計算する。

40

ただしここで  $Hash$  は、  $F_p$  値ハッシュ関数。

そして次を計算。

● $x[2|awWh]P[2B]=1$  の時。

●各  $awWh$  に対し、 $c[2\&1|awWh]=c[\#]-c[2\&\eta|awWh]$  とし、

$x[29\&1|awWh]=c[2\&1|awWh](x[26|\alpha])[(wWh)]+x[246\&1|awWh]$  を計算。

● $x[2|awWh]P[2B]=\eta$  の時。

●各  $awWh$  に対し、 $c[2\&\eta|awWh]=c[\#]-c[2\&1|awWh]$  とし、

$x[29\&\eta|awWh]=c[2\&\eta|awWh](x[26|\alpha])[(wWh)]+x[246\&\eta|awWh]$  を計算

$(c[\#]c[2\&1|awWh], x[29\&1|awWh]), (c[2\&\eta|awWh], x[29\&\eta|awWh])$  する。

さらに次を計算。

● $x[28\#]=c[\#]x[2\#]+x[24\#]$ ,  $x[268\#]=c[\#]x[26\#]+x[246\#]$ ,

● $y[8\#]=c[\#]y[\#]+y[4\#]$ ,

● $r[28\#]=c[\#]r[2\#]+r[24\#]$ ,  $\rho[268S[23]\#]=c[\#]\rho[26S[23]\#]+\rho[246S[23]\#]$ ,

● $r[8\#]=c[\#]r[2\#]+r[24\#]$ ,  $\rho[268S[233]\#|2]=c[\#]\rho[26\#|S[233]||2]+\rho[246S[233]\#|2]$

],

● $s[28S\#]=c[\#]s[24S\#]+s[24S\#]$ ,  $\tau[8S[233]\#]=c[\#]\tau[S[233]\#]+\tau[4S[233]\#]$ ,

● $r[28\#]=c[\#]r[2\#]+r[24\#]$ ,  $\rho[268T[2\&1]\#]=c[\#]\rho[26T[2\&1]\#]+\rho[246T[2\&1]\#]$ ,

● $\rho[268T[233]\#]=c[\#]\rho[26T[233]\#]+\rho[246T[233]\#]$ ,

● $r[8\#]=c[\#]r[2\#]+r[24\#]$ ,  $\rho[268T[233]\#|2]=c[\#]\rho[26T[233]\#|2]+\rho[246\#|T[233]||2]$

● $s[28T\#]=c[\#]s[24T\#]+s[24T\#]$ ,  $\tau[8T[233]\#]=c[\#]\tau[T[233]\#]+\tau[4T[233]\#]$ ,

● $\rho[2568U[25\&1]\#]=c[\#]\rho[256U[25\&1]\#]+\rho[2456U[25\&1]\#]$ ,

● $\lambda[8\#]=c[\#]\lambda[\#]+\lambda[4\#]$ ,  $\rho[2568\lambda\#]=c[\#]\rho[256\lambda\#]+\rho[2456\lambda\#]$ ,

● $NOT(\lambda)[8\#]=c[\#]NOT(\lambda)[\#]+NOT(\lambda)[4\#]$

$\rho[2568U[25\&2]\#]=c[\#]\rho[256U[25\&2]\#]+\rho[2456U[25\&2]\#]P[26]$ ,

● $\rho[2568U[25\&3]\#]=c[\#]\rho[256U[25\&3]\#]+\rho[2456U[25\&3]\#]P[26]$ ,

● $r[8\#]=c[\#]r[2\#]+r[24\#]$ ,  $\rho[2568T[2335:]\#|2]=c[\#]\rho[256T[2335:]\#|2]+\rho[2456T[2335:]\#|2]$ ,

● $s[258U\#]=c[\#]s[245U\#]+s[245U\#]$

$\tau[8T[2335:]\#]=c[\#]\tau[T[2335:]\#]+\tau[4T[2335:]\#]$ 。

そして、

10

20

30

40

PROOF1=(C[2x[2]#],C[2S[23]#],(C[2S[23]#|1|],C[2S[23]#|2|]),C[y,C[2S[23]#|1|],  
 C[2T[2&1]#],C[2T[233]#],(C[2T[23:l]#|1|],C[2T[23:l]#|2|]),C[2T[233]#],c[25U[25&  
 1]#],C[2λ#],C[2NOT(λ)#],C[2U[25&2]#],C[2U[25&3]#],C[2U[235:l]#],(C[2U[235:l]  
 #|1|],C[2U[235:l]#|2|]),C[y,C[2U[235:l]#|1|],C[2T[2335:l]#|2|],K[2&1|awWh|],K[2&  
 η|awWh|],K[2x[2]#],K[2J[2](x),Q[2]#],K[2y#],K[2r[2],s[2]#],K[2y,C[2S[233]#|1|],K[  
 2s[24S]#],K[2r[2],T[2]#],K[2J[2](x[2]),T[2&1]#],K[2s[24T]#],K[25U[25&1]#],K[2λ,P  
 [2]#],K[2λ,C[2λ]#],K[2U[25&2]#],K[2U[25&3]#],K[2U[235:l]#],K[2y,C[2T[2335:l]#|  
 1|],K[2s[245U]#],c[#],x[29&1|awWh|]),x[29&η|awWh|]),x[28#],x[268#],y[8#],r[28  
 #],p[268S[23]#]r[8#]p[268S[233]#|2|]s[28S#]r[28#]p[268T[2&1]#]p[268T[233]#]  
 r[8#]p[268T[233]#|2|]p[2568U[25&1]#],λ[8#],p[2568λ#],NOT(λ)[8#],p[2568U[25  
 &2]#],p[2568U[25&3]#],r[8#]p[2568T[2335:l]#|2|]s[258U#])とする。

10

[一周目の計算の正当性証明の検証1502の詳細]  
 PROOF11を受け取ったら、U1+1は以下を確認する。

20

●

c[#]=Hash(DATA11-1,BODY11,C[2x[2]#],C[2S[23]#],(C[2S[23]#|1|],C[2S[23]#|2|]),  
 C[y,C[2S[23]#|1|],C[2T[2&1]#],C[2T[233]#],(C[2T[23:l]#|1|],C[2T[23:l]#|2|]),C[2T[  
 233]#],K[2s[24T]#]c[25U[25&1]#],C[2λ#],C[2NOT(λ)#],C[2U[25&2]#],C[2U[25&3  
 ]#],C[2U[235:l]#],(C[2U[235:l]#|1|],C[2U[235:l]#|2|]),C[y,C[2U[235:l]#|1|],C[2T[23  
 35:l]#|2|],K[2&1|awWh|],K[2&η|awWh|],K[2x[2]#],K[2J[2](x),Q[2]#],K[2y#],K[2r[2],  
 s[2]#],K[2y,C[2S[233]#|1|],K[2s[24S]#],K[2r[2],T[2]#],K[2J[2](x[2]),T[2&1]#],K[25  
 U[25&1]#],K[2λ,P[2]#],K[2λ,C[2λ]#],K[2U[25&2]#],K[2U[25&3]#],K[2U[235:l]#],K[  
 2y,C[2T[2335:l]#|1|],K[2s[245U]#],),

30

●各 awWh に対し、以下が成立する事。

$$\begin{aligned} \bullet c[\#] &= c[2\&1|awWh|] + c[2\&\eta|awWh|] && , x[29\&1|awWh|] && P[6B] \\ &= c[2\&1|awWh|](C[2x[2]|awWh|] - P[2B]) + K[2\&1|awWh|], x[29\&1|awWh|] && P[6B] \\ &= c[2\&\eta|awWh|](C[2x[2]|awWh|] - \eta P[2B]) + K[2\&\eta|awWh|] \end{aligned}$$

40

●以下が成立する事

- $$x[28\#1]P[2]+x[28\#1]P[26] = c[\#1]C[2x[2]\#1]+K[2x[2]\#1],$$
- $$J[2](x[28\#1])Q[2\#1] = J[2](c[\#1])Q[2\#1]+K[2J[2](x),Q[2]\#1],$$
- $$y[8\#1] \in F_p,$$
- $$y[8\#1]P[2] = c[\#1](r[2:1]-r[2]) + K[2y\#1],$$
- $$y[8\#1] \in F_p,$$
- $$\begin{aligned} & r[28\#1]s[2:1-1] \\ & + \rho[268S[23]\#1]P[26] \\ & = c[\#1]C[2S[23]\#1] + K[2r[2],s[2]\#1], \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned} & c[\#1]C[2y,C[2S[23]]\#1|1] \\ & + K[2y,C[2S[23]]\#1|1] \\ & = y[8\#1]C[2S[23]\#1|2] \\ & + \rho[268S[233]\#1|2]P[26A[12]], \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned} & c[\#1](s[2\#1]-c[2S[233]\#1]) \\ & + K[2s[24S]\#1] \\ & = s[28S\#1]Y[:1] \\ & - \tau[8S[233]\#1]P[2], \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned} & r[28\#1]T[2:1-1] \\ & + \rho[268T[2\&1]\#1]P[26] \\ & = c[\#1]C[2T[2\&1]\#1] + K[2r[2],T[2]\#1], \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned} & J[2](x[28\#1])T[2\&1:1-1] \\ & + \rho[268T[233]\#1]P[26] \\ & = c[\#1]C[2T[233]\#1] + K[2r[2],T[2\&1]\#1], \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned} & c[\#1]C[2y,C[2T[23:1]]\#1|1] \\ & + K[2y,C[2T[23:1]]\#1|1] \\ & = y[8\#1]C[2T[23:1]\#1|2] \\ & + \rho[268T[233]\#1|2]P[26A[12]], \end{aligned}$$

を確認する。

$$\begin{aligned}
& c[\#1] (T[2\#1] - C[2T[233]\#1]) \\
& + \\
& K[2s[24T]\#1] \\
& = \\
& s[28T\#1]Y[:1] \\
& - \\
& \tau [8T[233]\#1]P[2],
\end{aligned}$$

10

$$r[28\#1] \in A[12F_p],$$

$$\begin{aligned}
& U[25:1-1]*F[25:1|0,0,0|](x[28\#1]) \\
& + \\
& \rho [2568U[25\&1]\#1]P[26] \\
& = \\
& c[\#1]c[25U[25\&1]\#1] \\
& + \\
& K[25U[25\&1]\#1],
\end{aligned}$$

20

各  $w_{ijk}, i[6], j[6], k[6]$  に対し

$\lambda [8\#1 | w_{ijk} | i[6], j[6], k[6]] \in F_p$  となる事、

$$\begin{aligned}
& \lambda[8\#1]P[2] + \rho[2568\lambda\#1]P[26] = c[\#1]C[2\lambda\#1] + K[2\lambda, P[2]\#1], \lambda[8\#1]C[2\lambda\#1] + \rho[2568\lambda\#1]P[26] \\
& = c[\#1]C[2\lambda\#1] + K[2\lambda, C[2\lambda]\#1],
\end{aligned}$$

$$\bullet C[2NOT(\lambda)\#1] = P[2] - C[2\lambda\#1],$$

30

$$\bullet c[\#1]C[2U[25\&2]\#1] + K[2U[25\&2]\#1] = F[25:1|\lambda[8L]00|NOT(\lambda)[8L]00](1)*U[25\&1] + \rho[2568U[25\&2]\#1]P[26],$$

$$\bullet c[\#1]C[2U[25\&3]\#1] + K[2U[25\&3]\#1] = F[25:1|\lambda[8R]00|NOT(\lambda)[8R]00](1)*U[25\&2] + \rho[2568U[25\&3]\#1]P[26],$$

$$\bullet c[\#1]C[2U[235:1]\#1] + K[2U[235:1]\#1] = F[25:1|\{00\lambda[8]|00NOT(\lambda)[8]\}(1)*U[25\&3],$$

$$\bullet c[\#1]C[2y, C[2U[235:1]\#1]1] + K[2y, C[2U[235:1]\#1]1] = y[8\#1]C[2U[235:1]\#1]2] + \rho[2568T[2335:1]\#1]2]P[26A[12]],$$

40

$$\bullet c[\#1](U[2\#1] - C[2T[2335:1]\#1]) + K[2s[245U]\#1] = s[258U\#1]Y[:1] - \tau[8T[2335:1]\#1]P[2].$$

[ 二周目の計算の正当性証明 ]

[ 二周目の計算の正当性証明の作成 1 5 0 7 の詳細 ]

U 1 はランダムに

$$y[4\&1] \in F_p$$

50

を選び、以下のようにしてPROOF 21を計算する。

- $P[4\&l]=y[4\&l]P,\Theta[4\&l|1]=y[4\&l]\Theta[\&l|1],$
- $c[\&l]=\text{Hash}(\text{DATA21-1} \parallel \text{BODY21-1} \parallel P[4\&l] \parallel \Theta[4\&l]),$
- $y[8\&l]=c[\&l]y[\&l]+y[4\&l],$
- $\text{PROOF21}=P[4\&l] \parallel \Theta[4\&l] \parallel c[\&l] \parallel y[8\&l].$

[二周目の計算の正当性証明の検証1502の詳細]  
 PROOF 11を受け取ったら、U1 + 1は以下を確認する。

10

- $y[8\&l]P=c(R[:l]-R[:l-1])+P[4]$
- $y[8\&l]\Theta[8\&l-1|0]=c(\Theta[\&l-1|0]-\Theta[\&l|0])+\Theta[4\&l-1|0]$

【産業上の利用可能性】

電子入札、電子競売等で、落札者以外の入札者の入札値を秘密にしたまま、入札者と入札価格を決定したい場合で、かつその決定が正しく行われたことを第三者が検証できる必要がある場合等や、電子投票等で匿名性を保ったまま正しく票数が数えられていることを第三者が検証できる必要がある場合等に、本発明方法を用いると有効である。

20

なぜならば、本発明方法を用いれば、上記入札、競売、投票の結果を複数の計算装置で行えば、誰も計算結果以外の情報を新たに得ることがなく、かつその計算の正当性を誰でも検証できるからである。そしてこの計算が従来技術を持ってして行うより効率的である。さらに、計算装置間の通信回数が少ないため、計算装置が通信に回線を確保するのに時間を費やす時間も少なく、効率的である。

【図1】

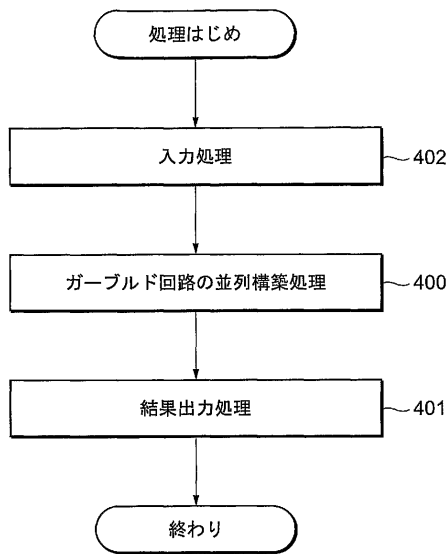


図1

【図2】

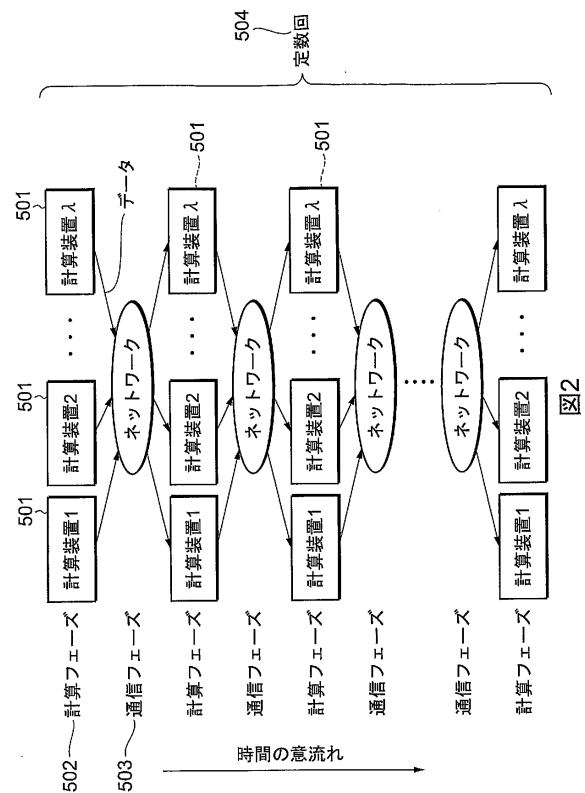


図2

【図3】

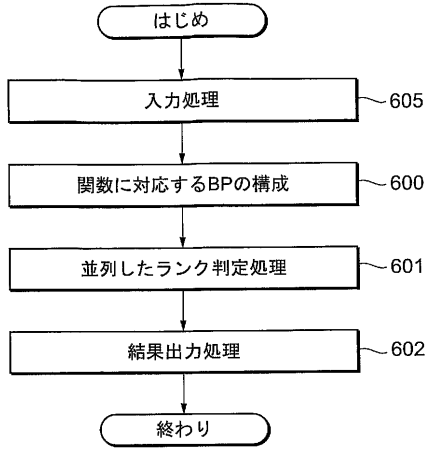


図3

【図4】

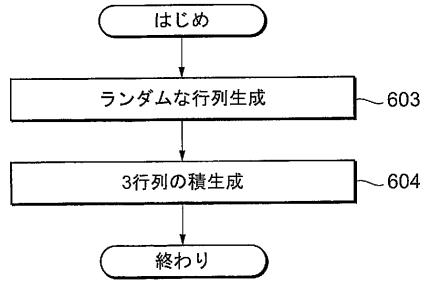


図4

【図6】

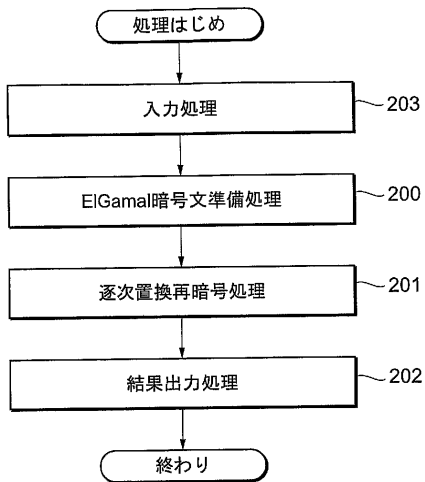


図6

【図5】

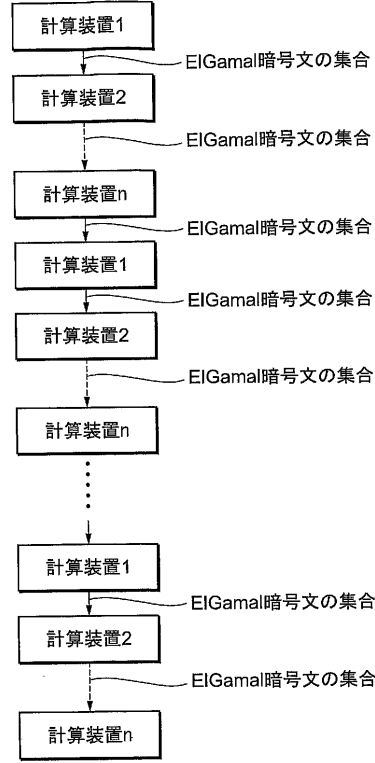


図5

【図7】

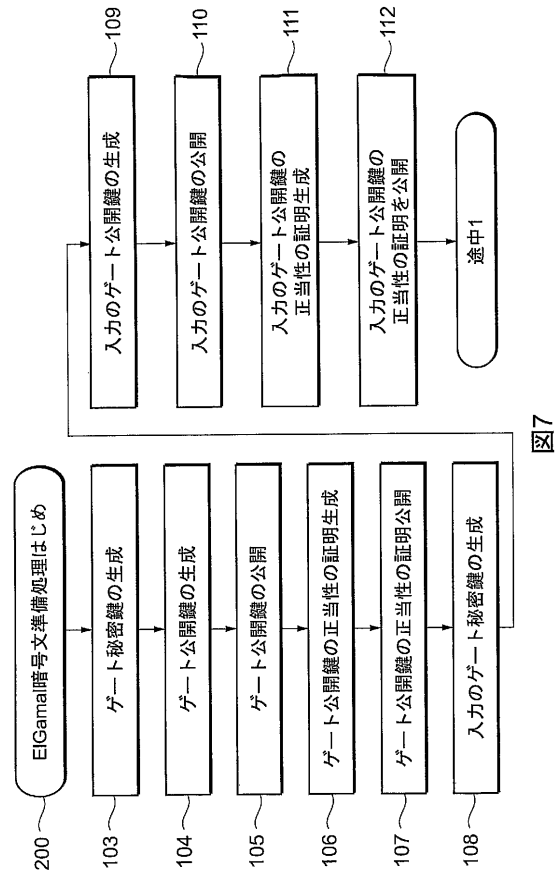


図7

【 図 8 】

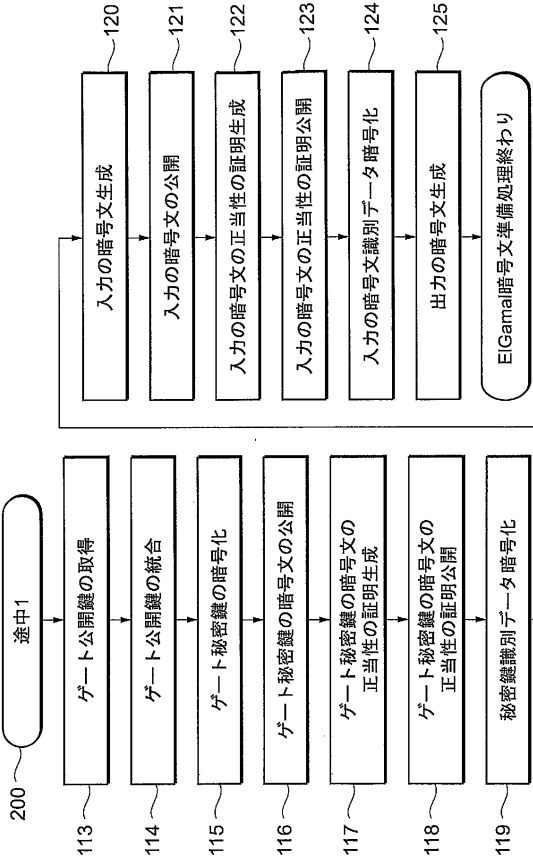


図8

【 図 9 】

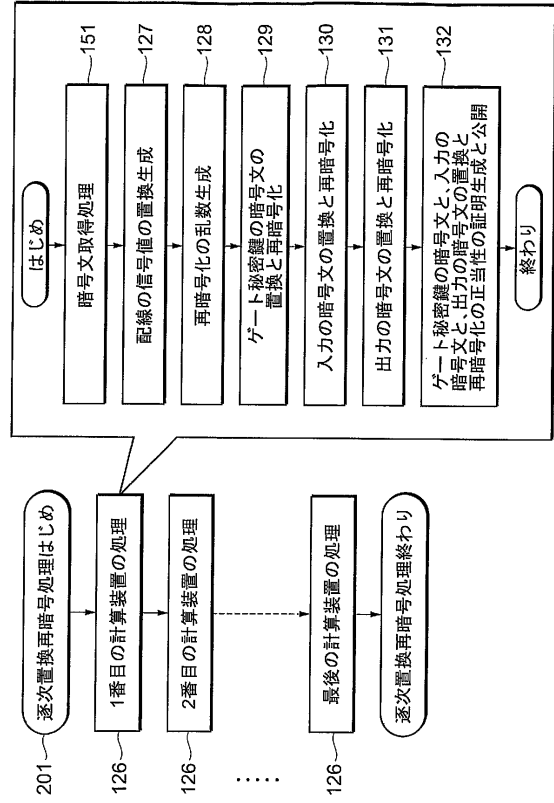


図9

【 図 1 0 】

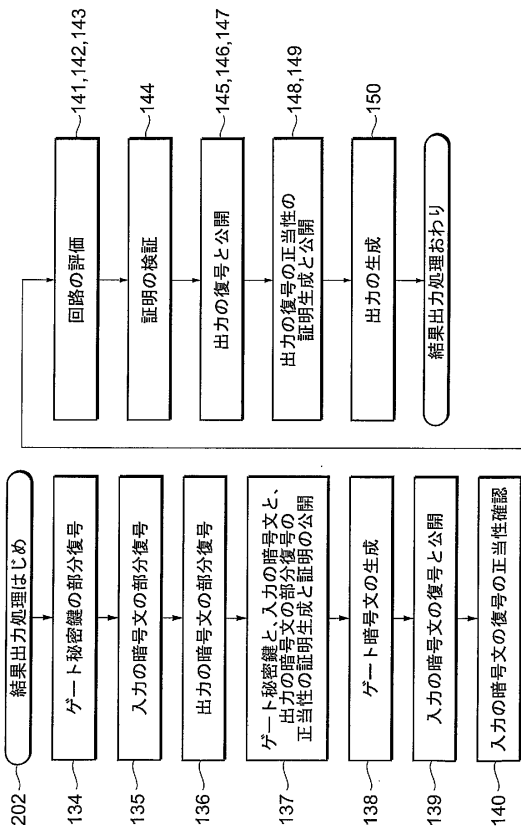


図10

【 図 1 1 】

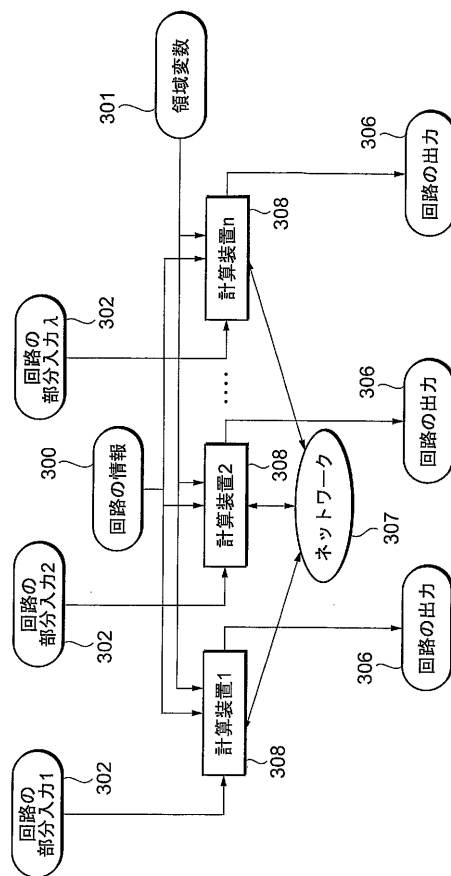


図11

【図12】

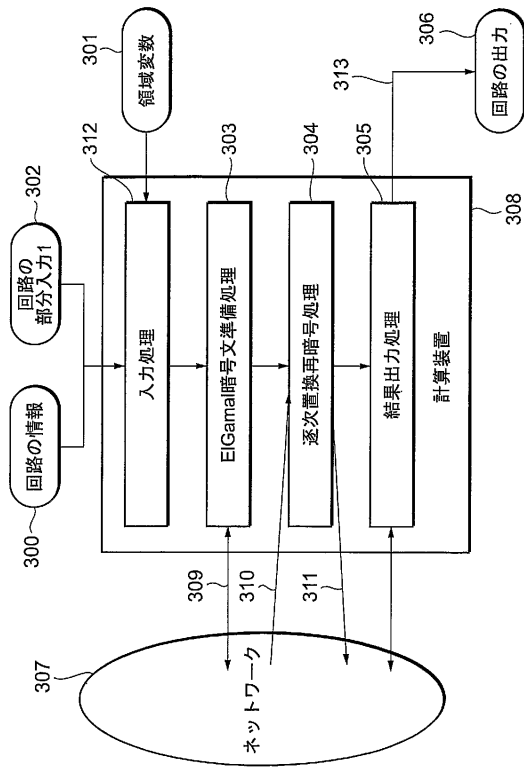


図12

【図13】

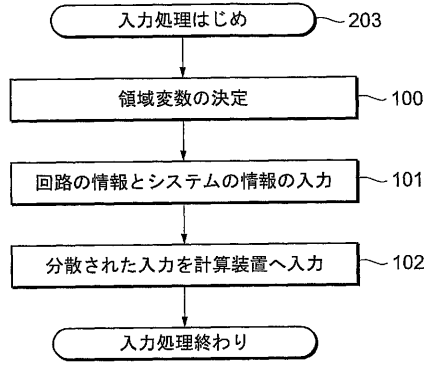


図13

【図14】

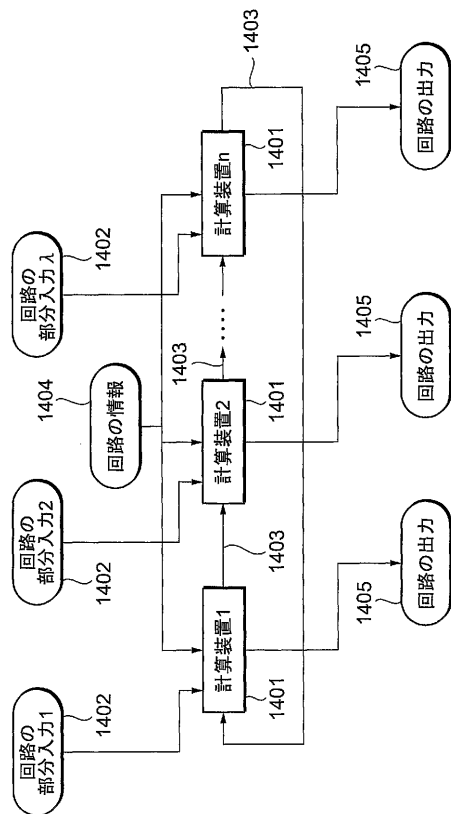


図14

【図15】

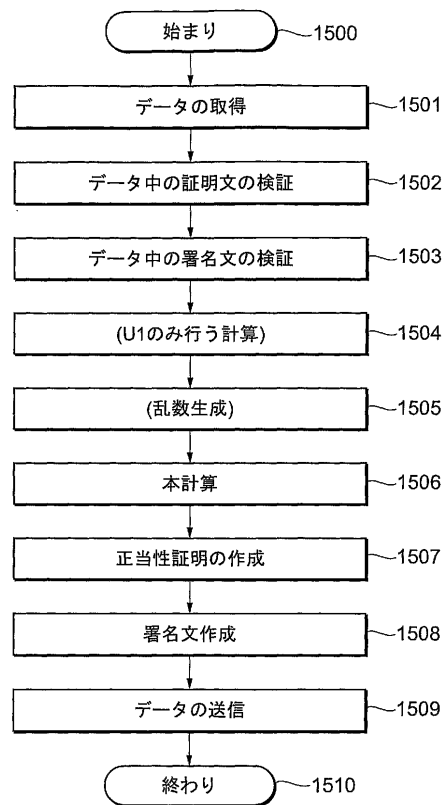


図15

【図16】

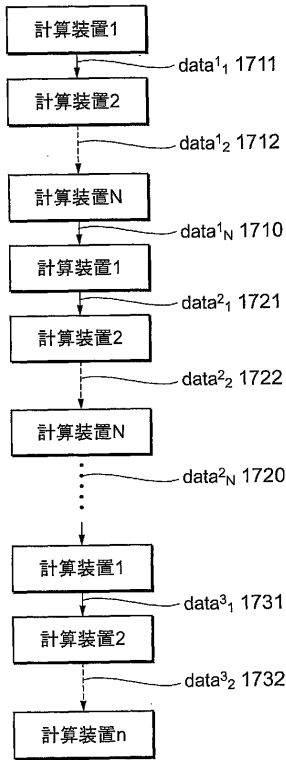


図16

【図17】

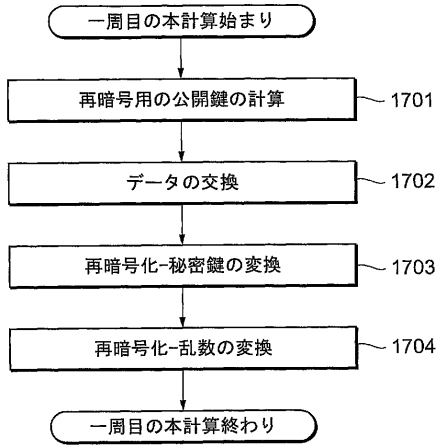


図17

【図18】

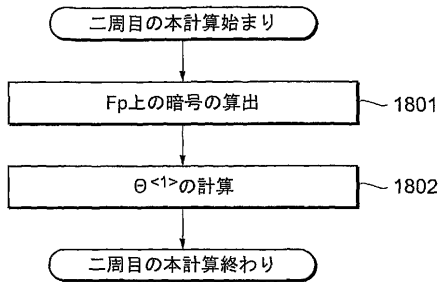


図18

【図19】

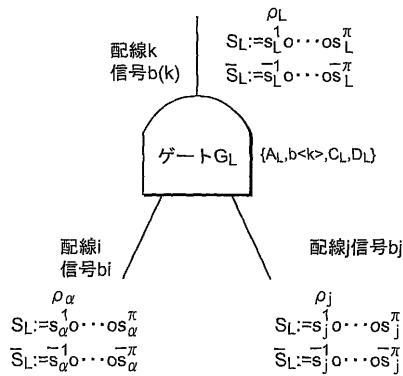


図19

---

フロントページの続き

審査官 中里 裕正

- (56)参考文献 特開2000-207483(JP,A)  
米国特許第06772339(US,B1)  
千田 浩司 Koji CHIDA,素因数分解問題に基づいた環準同型暗号とその応用 An Algebraic Privacy Homomorphism Based on Factoring and Its Applications,電子情報通信学会技術研究報告 Vol.103 No.315 IEICE Technical Report,日本,社団法人電子情報通信学会 The Institute of Electronics,Information and Communication Engineers,第103巻  
Beaver, D. et al., The Round Complexity of Secure Protocols, STOC '90 Proceedings of the twenty-second annual ACM symposium on Theory of computing, 1990年

(58)調査した分野(Int.Cl.,DB名)

G06F 17/10

H04L 9/32

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamII)