

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5337695号
(P5337695)

(45) 発行日 平成25年11月6日(2013.11.6)

(24) 登録日 平成25年8月9日(2013.8.9)

(51) Int.Cl.

F I

G 0 5 B 13/04 (2006.01)

G 0 5 B 13/04

G 0 5 B 13/02 (2006.01)

G 0 5 B 13/02

K

請求項の数 18 (全 10 頁)

(21) 出願番号 特願2009-525644 (P2009-525644)
 (86) (22) 出願日 平成19年8月24日(2007.8.24)
 (65) 公表番号 特表2010-501936 (P2010-501936A)
 (43) 公表日 平成22年1月21日(2010.1.21)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2007/018759
 (87) 国際公開番号 W02008/024479
 (87) 国際公開日 平成20年2月28日(2008.2.28)
 審査請求日 平成22年8月4日(2010.8.4)
 (31) 優先権主張番号 60/839,688
 (32) 優先日 平成18年8月24日(2006.8.24)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(73) 特許権者 390023630
 エクソンモービル リサーチ アンド エ
 ンジニアリング カンパニー
 EXXON RESEARCH AND
 ENGINEERING COMPANY
 アメリカ合衆国、ニュージャージー州 O
 8801-0900, アナンデイル, ルー
 ト 22 イースト, 1545, ビー. オ
 ー, ボックス 900
 (74) 代理人 100106596
 弁理士 河備 健二
 (72) 発明者 ホール, ロジャー, エス.
 アメリカ合衆国, マサチューセッツ州 5
 9102, ビリングス, マッケイ レーン
 2006

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 モデルゲイン行列を修正する方法を実行するコンピュータプログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

コントローラによって実行される多変数予測制御アプリケーション用の、少なくとも1つの独立 - 従属変数対を有するモデルについてのモデルゲイン行列を修正する方法を実行するコンピュータプログラムであって、

前記方法は、

- (a) 対数の底を選択する工程；
 - (b) 各々の独立 - 従属変数対についてモデルゲインを読みとる工程；
 - (c) 工程(a)で選択された対数の底と共に各々の独立 - 従属変数についてのゲインの絶対値の対数を取る工程；
 - (d) 工程(c)由来の数を固定された小数点以下の桁数まで四捨五入する工程；
 - (e) 工程(d)由来の特定の四捨五入の指数で累乗した工程(a)の対数の底を取ることにによりゲインを再度計算する工程；
 - (f) モデルゲインが当初負の数であった場合、工程(e)の結果に - 1 を乗じる工程；
- および
- (g) これらの計算したゲインをモデルゲイン行列に適用する工程
- を含むことを特徴とするコンピュータプログラム。

【請求項 2】

下式：

【数 1】

$$LOGBASE = \frac{1}{\left[1 - \frac{1}{MAX_RGA} \right]}$$

10

により決定される最大の許容可能な相対ゲインアレイ要素 (MAX_RGA) を選択することによって工程 (a) が実施されることを特徴とする請求項 1 に記載のコンピュータプログラム。

【請求項 3】

下式：

【数 2】

$$LOGBASE = \left[\frac{MAX_CHNG}{100} + 1 \right]^2$$

20

により決定される最大の許容可能な百分率ゲイン変化 (MAX_CHNG) を選択することによって工程 (a) が実施されることを特徴とする請求項 1 に記載のコンピュータプログラム。

30

【請求項 4】

工程 (d) で実施された四捨五入が、2つの独立変数 - 従属変数対からなる 2 × 2 の部分行列内で共線性を強制するように選択されることを特徴とする請求項 1 に記載のコンピュータプログラム。

【請求項 5】

工程 (d) で実施された四捨五入が、2つの独立変数 - 従属変数対からなる 2 × 2 の部分行列内で非共線性を強制するように選択されることを特徴とする請求項 1 に記載のコンピュータプログラム。

【請求項 6】

モデルゲインを修正するために用いられる内部ゲイン増倍率に対し更に適用されることを特徴とする請求項 1 に記載のコンピュータプログラム。

40

【請求項 7】

多変数予測制御用途のためにモデルが使用されることを特徴とする請求項 1 に記載のコンピュータプログラム。

【請求項 8】

多変数予測制御用途が DMC plus および RMPC T からなる群から選択されることを特徴とする請求項 7 に記載のコンピュータプログラム。

【請求項 9】

モデルゲイン行列が、線形計画への入力として使用されることを特徴とする請求項 1 に記載のコンピュータプログラム。

50

【請求項 10】

多変数予測制御用途に対する前処理ステップとして適用されることを特徴とする請求項 1 に記載のコンピュータプログラム。

【請求項 11】

計画・スケジューリング計算に対する前処理ステップとして適用されることを特徴とする請求項 1 に記載のコンピュータプログラム。

【請求項 12】

工程 (d) における四捨五入が小数点以下ゼロ桁までであることを特徴とする請求項 1 に記載のコンピュータプログラム。

【請求項 13】

製造プロセスを制御するために多変数予測制御用途が適用されることを特徴とする請求項 7 に記載のコンピュータプログラム。

【請求項 14】

製造プロセスが、精製所蒸留ユニット、化学プラント蒸留ユニット、原油蒸留ユニット、減圧蒸留ユニット、ナフサ改質装置、ナフサ水素化処理装置、ガソリン水素化処理装置、灯油水素化処理装置、ディーゼル水素化処理装置、軽油水素化処理装置、水素添加分解装置、ディレードコーカー、フルードコーカー、フレキシコーカー、水蒸気改質装置、硫黄工場、酸性廃水ストリップ、ボイラー、水処理工場およびこれらの組み合わせからなる群から選択された少なくとも 1 つの石油精製プロセスであることを特徴とする請求項 13 に記載のコンピュータプログラム。

【請求項 15】

工程 (d) における四捨五入が小数点以下 1 桁までであり、LOGBASE に 10 が乗じられることを特徴とする請求項 2 に記載のコンピュータプログラム。

【請求項 16】

工程 (d) における四捨五入が小数点以下 2 桁までであり、LOGBASE に 100 が乗じられることを特徴とする請求項 2 に記載のコンピュータプログラム。

【請求項 17】

工程 (d) における四捨五入が小数点以下 1 桁までであり、LOGBASE に 10 が乗じられることを特徴とする請求項 3 に記載のコンピュータプログラム。

【請求項 18】

工程 (d) における四捨五入が小数点以下 2 桁までであり、LOGBASE に 100 が乗じられることを特徴とする請求項 3 に記載のコンピュータプログラム。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、モデルゲイン行列を修正する方法に関する。特に本発明は、アスペンテクノロジー (Aspen Technology) 製のダイナミックマトリクスコントロール (Dynamic Matrix Control) (DMC または DMC plus) (例えば特許文献 1 参照) またはハネウェル (Honeywell) 製の RMPCT (例えば特許文献 2 参照) などのモデル予測プロセス制御用途に関する。これは同様に、不確定性を含む問題を解決するための線形計画 (例えばアスペン (Aspen) PIMS (商標) などの計画・スケジューリング計画) の使用が関与するあらゆる用途においても使用可能である。

【背景技術】**【0002】**

独立変数と従属変数の間の関係を予測するためには多変数モデルが使用される。多変数コントローラモデルについては、独立変数は、コントローラにより移動される操作された変数であり、制御された変数はそのプロセスにおける潜在的な制約となっている。多変数コントローラについては、モデルは、動的および定常状態関係を含む。

【0003】

大部分の多変数コントローラには、モデルからの定常状態情報（モデルゲイン）と共に経済的な基準を用いたある種の定常状態経済的最適化がソフトウェア内に組み込まれている。これは、独立変数と従属変数の間のゲインのプロセスモデル行列を最適化するために線形計画（LP）を使用するアスペンPIMSといったような計画・スケジューリング計画と類似する問題である。

【0004】

プロセスモデルについては、ほとんど常に、個々のモデル間の関係の大きさに幾分かの不確実性が存在する。多変数モデルの形に組合わされた時点で、小さいモデリング誤差が制御/最適化において大きな差異を結果としてもたらす可能性がある。スコゲスタッド（Skogestad）らは、モデル不確実性に対するコントローラの感応性を判断するためのブリストル相対ゲインアレイ（Bristol Relative Gain Array）（RGA）について記載している。RGAは、考慮対象の変数の間の考えられる全ての単一入力・単一出力対合のための相互作用尺度の行列である。彼は、大きなRGA要素（5または10超）が「強い相互作用および不確実性に対する感応性のためにプラントの制御が基本的に困難であるということを示す」と記載している。所与の正方モデル行列Gについて、RGAは

$$RGA(G) = G \times (G^{-1})^T$$

により定義される行列であり、この式中 $\times$ は、要素 $\times$ 要素の乗算（シュア積）を表わす。一般的な場合、モデルGは動的伝達関数であり得る。本発明を説明する上では、コントローラの定常状態の挙動のみを考慮し、モデルGはモデルゲインの行列にすぎないが、本発明はそのように限定されることを意図していない。

【0005】

（大きなRGA要素によって標示された）これらの感応性の問題に対処するために2つの主要なアプローチが考えられる。1つのアプローチは、最適化ステップにおけるモデル不確実性を明示的に説明することにある（例えば特許文献3を参照のこと）。もう1つのアプローチは、RGA要素を改善するべく、理想的には不確実性の範囲内でモデルに対する小さな変更を加えることにある。本発明は、第2のアプローチを実行するためのプロセスである。

【0006】

モデルゲイン操作のための現行の手動方法にはいくつかの問題点がある。標準的に、ユーザーは、目標閾値を超えるRGA要素をもつ全体のより大きな行列の内部において個別の 2×2 の「問題の」部分行列に集中する。ユーザーは、共線性を強制する（部分行列を非正則にする）かまたはゲインを広げて部分行列の非正則性を低くするために、所与の「問題の」部分行列内のゲインを変更することができる。このプロセスを全ての問題の部分行列に連続して適用するには、作業プロセスの反復的性質に起因して、非常に多くの時間がかかる。全体的行列の密度に応じて、行列内の1つのゲインの変更は数多くの 2×2 部分行列に影響を及ぼし得る。換言すると、1つの 2×2 部分行列のためのRGA要素を改善する（減少させる）ことによって、もう1つの 2×2 部分行列内のRGA要素は悪化する（増大する）かもしれない。多くの場合、問題の部分行列を修復する1回のラウンドの後、目標閾値より低い要素を有する部分行列はこのとき、この目標値を超えるRGA要素を有することになる。ゲイン操作の更なる反復は、以前の反復からの定点を逆転させることなく行なわれる必要がある。これによりユーザーは、所望のものまたは必要なものを超える大きさのゲイン変更を行なうことを余儀なくされることが多い。

【0007】

上述の手動プロセスを自動化することも同様に可能である。コンピュータアルゴリズムは、利用可能なソフトウェアおよび特注のソフトウェアの組み合わせを用いて手動方法を自動化するために書くことができる。典型的には、かかるコンピュータプログラムは、入力モデルとの関係における精度上の必要性和所要のRGA特性の改善の程度とのバランスをとるようある基準に基づいてゲインを調整する。このバランスを達成するために最適化技術を利用することができる。これらのアルゴリズムは本来、反復性をもち、許容可能な

解に到達するのに莫大な計算時間を必要とする可能性がある。これらには、全ての基準を満たす解を見出すことも同じく不可能であるかもしれない。

【 0 0 0 8 】

実際には、その R G A 特性を改善するための行列の修正は無視されることが多く、その結果、特に実際のプロセスを最適化するためにモデルが使用され、モデル誤差が存在する場合には、最適化解における挙動が比較的不安定になる。

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 9 】

【 特許文献 1 】 米国特許第 4 , 3 4 9 , 8 6 9 号明細書

10

【 特許文献 2 】 米国特許第 5 , 3 5 1 , 1 8 4 号明細書

【 特許文献 3 】 米国特許第 6 , 3 8 1 , 5 0 5 号明細書

【 発明の概要 】

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 1 0 】

本発明は、モデルゲイン行列を修正するための技術である。具体的には、この技術は、より大きなモデル行列を構成している 2×2 部分行列相対ゲインアレイ要素を改善させる。この技術には、 2×2 部分行列内の各ゲインの大きさの対数を取り、それを四捨五入し、次に逆対数を求めてより優れた R G A 特性をもつ修正済み部分行列を得ることが含まれる。対数の底は、R G A 特性の改善に対する精度の相対的重要度のバランスを保つように調整される。対数の底が増加するにつれて、部分行列の R G A 特性は改善されるが、考えられる変化の大きさは増大する。行列全体、または選択された部分行列は同じ（または関連する）対数の底を用いて修正される。本発明は、特に D M C p l u s および R M P C T からなる群から選択された多変数予測制御用途などの多変数予測制御用途のために使用され得る。多変数予測制御は、製油所、化学プラント、原子力、ガスまたは石炭によるものを含めた発電所、製紙工場において見出されるような製造プロセスを制御するために適用可能である。精油プロセスユニットの例としては、原油蒸留ユニット、減圧蒸留ユニット、ナフサ改質装置、ナフサ水素化処理装置、ガソリン水素化処理装置、灯油水素化処理装置、ディーゼル水素化処理装置、軽油水素化処理装置、水素添加分解装置、ディレードコーカー、フルードコーカー、フレキシコーカー、水蒸気改質装置、硫黄工場、酸性廃水ストリッパ、ボイラー、水処理工場およびこれらの組み合わせからなる群から選択された少なくとも 1 つのユニットが含まれる。更に、本発明は、P I M S などの L P モデルと併用可能である。

20

30

【 0 0 1 1 】

本発明は、R G A 特性を改善すべくモデル行列を修正するプロセスを大幅に簡略化する。一般に、行列全体の中の全ての要素が第 1 の反復時点で修正され、結果として得られた行列は、所望の閾値よりも大きい単一の 2×2 部分行列 R G A 要素を全くもたないことが保証される。本発明は、理想的にはコンピュータアルゴリズムを介した実行に適しており、従って、アルゴリズムがひとたび生成された時点で、各々の部分行列および全体の行列を修正するのに必要な時間を、大幅に削減することができる。

40

【 0 0 1 2 】

本発明には、以下のものが含まれる：

- 1 . 行列中の個々の値を修正するための対数四捨五入技術の応用。
- 2 . 最終的行列中の 2×2 部分行列についての所望の最大 R G A 要素を所与として、四捨五入プロセス内で使用すべき対数の底を計算するための技術。
- 3 . 各々の部分行列内または全体的行列における任意の値について許容された所望の最大百分率変化を所与として、四捨五入プロセスにおいて使用すべき対数の底を計算するための技術。
- 4 . 対数四捨五入プロセスにより非共線性にされた共線性 2×2 部分行列を元に戻すための技術。

50

５．正確に共線性または非共線性となるように最終的行列内の 2×2 部分行列を強制するための技術。これらのおよびその他の特徴について後述する。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 3 】

【図 1】２つの独立変数および２つの被制御変数を有する単純な蒸留ユニットを例示する流れ図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 4 】

１つの問題例により詳細な説明が示される。２つの独立変数と２つの従属変数を伴う予測モデルを考慮されたい。ゲイン行列は、両方の独立変数と両方の従属変数の間の相互作用を表わす。表 1 は、 2×2 モデル予測行列の一例を示す。

【 0 0 1 5 】

この問題についてのプロセス例として単純なライトエンド蒸留塔を使用することができる。この場合、図 1 に示されているように、IND 1 は、リボイラスチーム投入量であり、IND 2 は還流速度であり、DEP 1 はオーバーヘッド製品流内の C 5 + (ペンタン以上の重質分) の濃度であり、DEP 2 は、ボトム製品流内の C 4 - (ブタン以下の軽質分) の濃度である。この問題例においては、２つの製品の品質に対する相対的効果は、どの独立変数が操作されているかとは無関係に、ゲイン比の観点からみて非常に類似している。リボイラスチームが増加した場合、オーバーヘッド中の C 5 は増加し、ボトム製品中の C 4 は減少する。還流速度が増加すると、オーバーヘッド製品中の C 5 は減少するが、ボトム製品中の C 4 は増加する。２つの独立変数は、２つの従属変数に対し、類似ではあるが反対の効果を有する。

【 0 0 1 6 】

ゲイン行列は、両方の独立変数と両方の従属変数の間の相互作用を表わしている。

【 0 0 1 7 】

【表 1】

	DEP1 (%C5+オーバーヘッド)	DEP2 (%C4-ボトム)
IND1 (リボイラスチーム)	37	-27
IND2 (還流速度)	-30	22

【 0 0 1 8 】

相対ゲインアレイについての式は以下の通りである：

$$RGA(G) = G \times (G^{-1})^T \quad (1)$$

【 0 0 1 9 】

RGA 式が本発明者らの 2×2 問題例に適用された場合、結果は 2×2 アレイである。

【 0 0 2 0 】

【表 2】

203.5	-202.5
-202.5	203.5

【 0 0 2 1 】

これらの RGA 要素は非常に高い大きさを有し、これは望ましくない。受容可能な最大の RGA 要素の大きさが例えば 18 と選択された場合、行列を修正するために使用される対数の底を計算するために以下の式を用いることができる。

10

20

30

40

【数 1】

$$\text{LOGBASE} = \frac{1}{\left[1 - \frac{1}{\text{MAX_RGA}}\right]} = \frac{1}{\left[1 - \frac{1}{18}\right]} = 1.0588235... \quad (2)$$

【0022】

元の行列中の各ゲインについて、以上（1.0588235...）から選択された底をもつ数の絶対値の対数が計算され、その結果、表3に示された行列が得られる。

【0023】

10

【表 3】

	DEP1	DEP2
IND1	63.17386488	57.66144728
IND2	59.50475447	54.07852048

【0024】

好ましい実施形態においては、これらの数の各々が、最も近い整数に四捨五入される。式2で示された式は、所望の四捨五入が最も近い整数に対するものである場合に当てはまる。四捨五入が最も近い小数点以下1桁（1/10）まで望まれる場合には、式2で計算したLOGBASEに10を乗じる。四捨五入が最も近い小数点以下2桁（1/100）まで望まれる場合には、式2で計算したLOGBASEに100を乗じる。この方法は所望の小数以下の桁数に対応する10の累乗値を式2で計算したLOGBASEに単純に乘じることにより、小数以下の任意の精度に適用することができる。結果として得られる整数行列は、表4に示されている。

20

【0025】

【表 4】

	DEP1	DEP2
IND1	63	58
IND2	60	54

30

【0026】

ゲインは、表4に示された整数乗で式(2)からの対数の底を取るにより再計算される。元のゲインが負の数であった場合、結果に-1が乗じられる。これらのステップを適用すると、結果として表5に示された修正済みゲイン行列が得られる。

【0027】

【表 5】

	DEP1	DEP2
IND1	36.63412093	-27.52756876
IND2	-30.86135736	21.90148291

40

【0028】

RGA式をこの行列に適用すると、最高のRGA要素の大きさは、表6に示されている本発明者らの所望の最大値と等しくなる。

【0029】

【表 6】

-17	18
18	-17

【0030】

50

行列修正プロセスは、元のゲイン行列内に比較的小さな変更を加えることによってこれを行なうことができた。相対量に基づき、個々の応答の各々におけるゲイン変化量は下表 7 に示されている。この変化量は通常モデル精度の範囲内に充分入るものである。

【 0 0 3 1 】

【表 7】

	DEP1	DEP2
IND1	-0.99%	1.95%
IND2	2.87%	-0.45%

【 0 0 3 2 】

10

一変形実施形態においては、対数の底数を、以下の式 (3) を用いて、百分率単位で表わした最大所望ゲイン変化に基づいて選択することができる。以上で用いた問題例については、およそ 2 . 9 % の最大ゲイン変化が、以上で選択されたものと同じ対数の底を結果としてもたす。

【数 2】

$$LOGBASE = \left[\frac{MAX_CHNG}{100} + 1 \right]^2 \quad (3)$$

【 0 0 3 3 】

20

もう 1 つの変形実施形態においては、オペレーションが行なわれている全ての行列要素について任意の固定された小数以下の桁数まで、対数をとられたゲインを四捨五入することができる。使用を容易にするため、対数をとられたゲインを 1 整数値まで四捨五入することで所望の結果を得ることができる底の対数を選択することが理に適っている。しかしながら、底の対数が調整されるならば、任意の小数以下の桁数まで四捨五入することによって同等の結果が得られる。例えば、以上の例における底の対数が、以前より 1 0 乗大きくなるように選択される場合、

$$LOGBASE = 1.0588235^{10} = 1.77107 \quad (4)$$

ゲインの対数を最も近い 1 / 1 0 まで四捨五入することで同等の結果が得られる。

【 0 0 3 4 】

30

もう 1 つの変形実施形態においては、四捨五入された数を、所望の共線性条件を強制するように選択することができる。2 つの独立変数についてのゲインの四捨五入された対数の間の差異が 2 つの異なる従属変数について同じである場合には、その 2 × 2 部分行列は共線性である。換言すると、それは、2 という階数ではなく 1 という階数を有する。四捨五入の方向は、共線性を強制するかまたは非共線性を強制するように選択可能である。表 3 からのゲインの対数の四捨五入方向が、共線性を強制するように選択された場合、図 8 に示されている通りに整数を選択することができる。

【 0 0 3 5 】

【表 8】

	DEP1	DEP2
IND1	63	58
IND2	59	54

40

【 0 0 3 6 】

ゲインを再計算することで得られる結果としての行列は、表 9 に示されている通り、階数 1 のものである。

【 0 0 3 7 】

【表 9】

	DEP1	DEP2
IND1	36.63412093	-27.52756876
IND2	-30.86135736	21.90148291

【0038】

好ましい実施形態に含まれるのは、予測モデルの内部で使用される任意のゲイン増倍率に対する同じアルゴリズムの適用である。変化する条件に応じてモデルを修正するためにはゲイン増倍率が用いられることが多い。モデルと同じ四捨五入された底の累乗となるようにゲイン増倍率を選択することにより、ゲイン増倍モデルが同じ全体 R G A 特性を有することが保証される。

10

【0039】

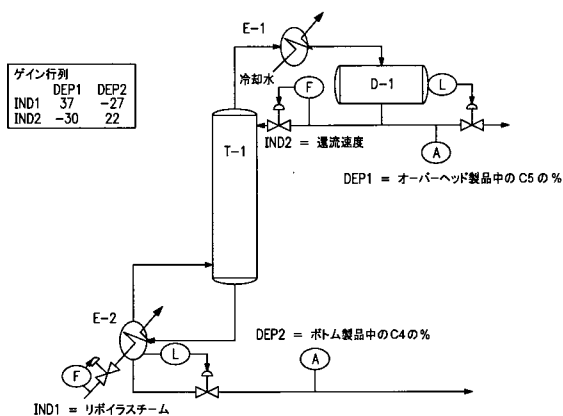
最終的予測モデルを構築するために用いられるビルディングブロックモデルに対して同じアルゴリズムを適用することは、好ましい実施形態に含まれる。多くの場合、最終的モデルが、最終的な適用には存在しないビルディングブロックモデルの何らかの組み合わせの結果である。この同じプロセスをこれらのビルディングブロックモデルに適用することにより、最終的モデルは同じ R G A 特性を有することになる。

【0040】

以上の説明および図面は、本発明の好ましい実施形態を例示するものにすぎず、本発明をそれに限定するよう意図されていない。以下の特許請求の範囲の趣旨および範囲内に入るあらゆる主題または修正は、本発明の一部とみなされるべきである。

20

【図 1】



フロントページの続き

- (72)発明者 ピーターソン, トッド, ジェイ.
アメリカ合衆国, バージニア州 20171, ハーンドン, カッパー ベッド ロード 1350
6
- (72)発明者 ポットルフ, トレバー, エス.
アメリカ合衆国, テキサス州 75019, コッペル, ハースウッド ドライブ 104
- (72)発明者 ブヌル, アディ, アール.
アメリカ合衆国, バージニア州 20171, オーク ヒル, ハリントン コート 12903
- (72)発明者 バウエル, ルイス, イー.
アメリカ合衆国, マサチューセッツ州 59105, ビリングス, ムーン バレー ロード 94
5

審査官 青山 純

- (56)参考文献 特表2006-524862(JP, A)
渡辺 雅弘, モデル予測制御パッケージ『DMC plus』によるプラント高度制御のためのエ
ンジニアリング手法, 横河技報, 日本, 横河電機株式会社, 1999年 7月20日, 第43巻
第3号, 第115-120頁
- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G05B 13/04
G05B 13/02