(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第5330316号
(P5330316)
(45)発行日　平成25年10月30日(2013.10.30)　(24)登録日　平成25年8月2日(2013.8.2)

(51)Int.Cl.　F I
G06Q 50/04 (2012.01)　G06Q 50/04 100

請求項の数 7 (全 22 頁)

(21)出願番号　特願2010-123740(P2010-123740)
(22)出願日　平成22年5月31日(2010.5.31)
(65)公開番号　特開2010-282619(P2010-282619A)
(43)公開日　平成22年12月16日(2010.12.16)
審査請求日　平成25年5月29日(2013.5.29)
(31)優先権主張番号　61/183,440
(32)優先日　平成21年6月2日(2009.6.2)
(33)優先権主張国　米国(US)
(31)優先権主張番号　12/498,943
(32)優先日　平成21年7月7日(2009.7.7)
(33)優先権主張国　米国(US)

早期審査対象出願

(73)特許権者　502096543
パロ・アルト・リサーチ・センター・インコーポレーテッド
Ｐａｌｏ　Ａｌｔｏ　Ｒｅｓｅａｒｃｈ　Ｃｅｎｔｅｒ　Ｉｎｃｏｒｐｏｒａｔｅｄ
アメリカ合衆国、カリフォルニア州　９４３０４、パロ・アルト、コヨーテ・ヒル・ロード　３３３３
(74)代理人　100075258
弁理士　吉田　研二
(74)代理人　100096976
弁理士　石田　純
(72)発明者　ジュアン　リウ
アメリカ合衆国　カリフォルニア　ミルピタス　ジャックリン　プレイス　４４
最終頁に続く

(54)【発明の名称】パーベイシブ・モデル適応：動的生産システムにおける計画と情報収集の統合

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
パーベイシブ・モデル適応のためのコンピュータ実装方法であって、
生産システムに動作シーケンスを含む生産計画を提供するステップと、
前記生産システム内において前記生産計画を実行するステップと、
前記生産計画の実行の間に前記生産システム内の少なくとも１つのセンサによってもたらされる観察データをコンピュータ・メモリ内に収集するステップと、
前記収集された観察データに基づいて前記コンピュータ・メモリ内のシステム・モデルに対してなされるべき変更を計算するステップと、
前記計算された変更に従って前記システム・モデルを動的に更新するステップと、
前記動的に更新されたシステム・モデルに少なくとも部分的に基づいて更新された生産計画を作成するステップと、
前記更新された生産計画を前記コンピュータ・メモリ内に格納するステップと、
を包含し、
前記システム・モデルは、前記生産システムについて真であると考えられることの表現であり、
前記生産計画及び動的に更新された生産計画は、最適化され、最適な生産性を提供し、同時に又はほぼ同時に、前記システム・モデルを動的に更新するための最大化された情報内容の値を提供し、
前記動的に更新されたシステム・モデルに少なくとも部分的に基づいて更新された生産

計画を作成するステップは、
前記生産システムの内部制約に基づいて有向グラフを作成するステップと、
情報内容を最大化する経路を作り出すために、最良優先サーチ・アルゴリズムのための評価関数として情報内容関数を利用することによって前記最良優先サーチ・アルゴリズムを前記有向グラフ上で実行するステップと、
前記最良優先サーチ・アルゴリズムによってもたらされる前記経路を前記更新された生産計画としてセットするステップと、を包含し、
前記情報内容関数は、カルマンフィルタを利用する、
ことを特徴とする方法。
【請求項２】
前記最良優先サーチ・アルゴリズムは、Ａ＊グラフ探索アルゴリズムである、
ことを特徴とする、請求項１に記載の方法。
【請求項３】
パーベイシブ・モデル適応のためのコンピュータ・ベースのシステムであって、
（ｉ）生産システムの少なくとも１つのセンサによってもたらされる観察データを受信し、かつ前記生産システムからの前記受信された観察データに基づいて前記生産システムのシステム・モデルに対してなされるべき変更を計算するべく構成されたモデル適応エンジンと、
（ｉｉ）前記モデル適応エンジンからの前記計算された変更に基づいて前記システム・モデルを動的に更新するべく設計されたシステム・モデル・モジュールと、
（ｉｉｉ）前記システム・モデル・モジュールからの前記更新されたシステム・モデルに少なくとも部分的に基づいて動作シーケンスを含む生産計画を更新するべく設計されたプランナ・モジュールと、
を具現化するコンピュータ実行可能命令を含む少なくとも１つのメモリと、
前記コンピュータ実行可能命令を実行する少なくとも１つのプロセッサと、
を備え、
前記プランナ・モジュールは、
前記生産システムの内部制約に基づいて有向グラフを生成するよう構成された制約条件モジュールと、
前記システム・モデルに基づいてヒューリスティクスを生成するよう構成された情報評価基準モジュールと、
前記制約条件モジュールからの前記有向グラフ及び前記情報評価基準モジュールからの前記ヒューリスティクスに基づいて生産計画を更新するよう構成されたサーチ・モジュールと、
を包含し、
前記サーチ・モジュールは、
情報内容を最大化する経路を作り出すために、最良優先サーチ・アルゴリズムのための評価関数として情報内容関数を利用することによって前記最良優先サーチ・アルゴリズムを前記制約条件モジュールにより生成された前記有向グラフ上で実行し、
前記最良優先サーチ・アルゴリズムによってもたらされる前記経路を前記更新された生産計画としてセットし、
前記情報内容関数は、カルマンフィルタを利用する、
ことを特徴とするパーベイシブ・モデル適応のためのコンピューターベースのシステム。
【請求項４】
前記最良優先サーチ・アルゴリズムは、Ａ＊グラフ探索アルゴリズムである、
ことを特徴とする、請求項３に記載のシステム。
【請求項５】
パーベイシブ・モデル適応のためのコンピュータ・ベースのシステムであって、
（ｉ）生産システムの少なくとも１つのセンサによってもたらされる観察データを受信

し、かつ前記生産システムからの前記受信された観察データに基づいて前記生産システムのシステム・モデルに対してなされるべき変更を計算するべく構成されたモデル適応エンジンと、
（ｉｉ）前記モデル適応エンジンからの前記計算された変更に基づいて前記システム・モデルを動的に更新するべく設計されたシステム・モデル・モジュールと、
（ｉｉｉ）前記システム・モデル・モジュールからの前記更新されたシステム・モデルに少なくとも部分的に基づいて生産計画を更新するべく設計されたプランナ・モジュールと、
を具現化するコンピュータ実行可能命令を含む少なくとも１つのメモリと、
前記コンピュータ実行可能命令を実行する少なくとも１つのプロセッサと、
を備え、
前記プランナ・モジュールにより更新された前記生産計画は、生産性及び最大化された情報内容の値のために最適化され、
前記プランナ・モジュールは、
前記生産システムの内部制約に基づいて有向グラフを生成するよう構成された制約条件モジュールと、
前記システム・モデルに基づいてヒューリスティクスを生成するよう構成された情報評価基準モジュールと、
前記制約条件モジュールからの前記有向グラフ及び前記情報評価基準モジュールからの前記ヒューリスティクスに基づいて生産計画を更新するよう構成されたサーチ・モジュールと、
を包含し、
前記サーチ・モジュールは、
情報内容を最大化する経路を作り出すために、最良優先サーチ・アルゴリズムのための評価関数として情報内容関数を利用することによって前記最良優先サーチ・アルゴリズムを前記制約条件モジュールにより生成された前記有向グラフ上で実行し、
前記最良優先サーチ・アルゴリズムによってもたらされる前記経路を前記更新された生産計画としてセットし、
前記情報内容関数は、カルマンフィルタを利用する、
ことを特徴とするパーベイシブ・モデル適応のためのコンピューターベースのシステム。

【請求項６】
前記最良優先サーチ・アルゴリズムは、Ａ＊グラフ探索アルゴリズムである、
ことを特徴とする、請求項５に記載のシステム。
【請求項７】
前記生産計画は、前記システム・モデルの動作シーケンスを含む、
ことを特徴とする、請求項５に記載のシステム。

【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
この例示的な実施形態は、生産システムにおけるパーベイシブ・モデル適応（ｐｅｒｖａｓｉｖｅ　ｍｏｄｅｌ　ａｄａｐｔａｔｉｏｎ）に関する。
【背景技術】
【０００２】
生産システム等のシステムにおいては、システム性能および構成要素の状況の自動化されたモデル適応が、生産性の向上、欠陥があるかまたは性能不足のリソースの識別、修復のスケジューリングまたは保守等々を好都合に補助できる。正確なモデル適応は、生産システム内の構成要素の真の状態についての情報を必要とする。その種の情報は、個別の構成要素に関連付けされたセンサから直接獲得することが可能であるか、かつ／またはシス

テム構造およびダイナミクスのモデルまたはそのほかの知識を使用して生産システム内の限られた数のセンサの読み取り値から推論することができる。苛酷な生産環境において、可能性のあるすべてのシステム障害のための完全なセンサ有効範囲を提供することは不経済か、または非実用的となりかねず、したがって代わりにモデル適応手順を採用し、限られたセンサから検出されるか、または推測される障害の原因を推論することが概して好ましい。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００３】

システム・モデル適応の情報は、通常、生産を中断する間にシステムを働かせて試験を行い、生産を達成することなしに観察を記録することを伴う専用または明示的なモデル適応をはじめ、正常な生産の間にシステムのセンサから情報が集められる受動的モデル適応を含む２つの方法のうちの１つによって集められる。後者のテクニックは、生産を中断することなしにいくつかの情報の推論を可能にするが、正規の生産モードは、長期生産性を向上させる適切なモデル適応情報を提供するだけ充分にシステムを働かせることができない。その上、専用モデル適応動作は、概して受動的なモデル適応より良好な情報を提供するが、短期生産性の低下という点で、特に再三にわたるモデル適応の介入を必要とする繰り返し発生する断続的なシステム構成要素の障害を診断するとき、この情報はコストが高い。

【０００４】

したがって従来的な生産モデル適応システムは、概して、生産を停止させることおよびシステムのダウンタイムに関連するコストを招くことなしに有用なモデル適応情報を適切にもたらすことができず、したがって長期システム生産性の達成において有用性が限られる。したがって、長期および短期両方の生産性到達目標が、限られたセンサ配置だけしか持たない生産システムにおいて達成可能になる、改善されたコントロール・システムおよびテクニックについての必要性が存在する。

【課題を解決するための手段】

【０００５】

本発明の一態様は、パーベイシブ・モデル適応のためのコンピュータ実装される方法であって、生産システムに生産計画を提供するステップと、前記生産システム内において前記生産計画を実行するステップと、前記生産計画の実行の間に前記生産システム内の少なくとも１つのセンサによってもたらされる観察データをコンピュータ・メモリ内に収集するステップと、前記収集された観察データに基づいて前記コンピュータ・メモリ内のシステム・モデルに対してなされるべき変更を計算するステップと、前記計算された変更に従って前記システム・モデルを動的に更新するステップと、前記動的に更新されたシステム・モデルに少なくとも部分的に基づいて更新された生産計画を作成するステップと、前記更新された生産計画を前記コンピュータ・メモリ内に格納するステップと、を包含し、前記システム・モデルは、前記生産システムについて真であると考えられることの表現である、方法である。

【図面の簡単な説明】

【０００６】

【図１】生産システム、システム・モデル、モデル適応エンジン、およびプランナが含まれるパーベイシブ・モデル適応のための例示的なシステムの高レベルの概要図である。

【図２】制約条件モジュール、情報評価基準モジュール、およびサーチ・モジュールが含まれる図１のプランナの詳細図である。

【図３】一例の生産システムである印刷システムを図解した説明図である。

【図４】パーベイシブ・モデル適応コンピュータ・システムの作用構成要素を図解した説明図である。

【図５】図４のシステムを使用するべく適応されたパーベイシブ・モデル適応のための方法を図解したフローチャートである。

【図６】物理的な生産システムの略図、および図１のパーベイシブ・モデル適応システムが物理的な生産システム内にどのように実装されるかを図解した説明図である。
【図７】図２の制約条件モジュールによって出力され得る一例を図解した有向グラフである。
【図８】正規、一様、パーベイシブ、および専用、それぞれのモデル適応方法の性能を比較したグラフである。
【図９】４つの異なる生産ストラテジの不確実性を比較したグラフである。
【図１０】４つの異なる生産ストラテジの生産性をそれぞれ比較したグラフである。
【発明を実施するための形態】
【０００７】
この例示的な実施形態の態様は、生産計画および生産システムに関係するパーベイシブ・モデル適応についてのシステムおよび方法に関する。概して言えば、生産計画は、生産性を最適化するべく生産システムに提供される。しかしながら生産システムは、時間を通じて変化する傾向にあり、生産計画は時として、生産システム内の問題および変化の検出のためといった、生産性のない目的のために最適化されなければならない。しかしながら情報を収集する生産計画が実施されるときには生産性が失われる。この例示的な実施形態は、高い生産性レートを維持する一方で同時に将来的な生産性計画の更新および生産システムの構成要素に関する不確実性の低減の目的のため生産システムについての情報を収集する生産システムのための生産計画を作成する。
【０００８】
図１を参照して例示的なパーベイシブ・モデル適応システム１００について述べる。一般的な意味において、パーベイシブ・モデル適応システム１００は、プランナ（ｐｌａｎｎｅｒ）１０２、システム・モデル１０４、およびモデル適応エンジン１０６を含み、「実世界の」物理的なシステム１０８に関して動作する。プランナ１０２は、実質的に同時に２つの到達目標、（１）物理的なシステム１０８による高い生産性、および（２）モデル適応エンジン１０６におけるモデル適応を容易にするために物理的なシステム１０８についての情報１１６を収集する能力、を達成する生産計画１１０を作成するべく適応される。モデル適応エンジン１０６は、物理的なシステム１０８の出力１１６に基づいて更新された状態パラメータ１１４を用いてシステム・モデル１０４を更新するべく適応される。システム・モデル１０４は、物理的なシステム１０８について真であると考えられていることの表現である。システム・モデル１０４は、物理的なシステム１０８自体ではないが、物理的なシステム１０８についての「信念モデル（ｂｅｌｉｅｆ　ｍｏｄｅｌ）」である。システム・モデル１０４は、モデル適応エンジン１０６からの更新された情報１１４に基づいて継続的に変化するという点で動的である。
【０００９】
概念的に言えば、プランナ１０２によって実施される計画は、所定のコスト関数または最適性評価基準に関して最適計画を見つけ出す一般問題として考えることができる。伝統的な計画においては、特定の構造のコスト関数が、複数のコスト関数のうちの１つであると仮定される。たとえばコスト関数を、計画の構成要素にわたって加算性とすること、局所的に最適サブセットに分解可能とすること、または計画内の構成要素の順序に関する不変量とすることができる。これらのコスト関数は、Ａ＊サーチ（Ａ＊探索）または動的計画法（ｄｙｎａｍｉｃ　ｐｒｏｇｒａｍｍｉｎｇ）等の周知のアルゴリズムを介して効率的な計算を可能にする。パーベイシブ・モデル適応においては、生産計画とモデル適応の統合が、結果として「情報価値のある計画（ｉｎｆｏｒｍａｔｉｖｅ　ｐｌａｎｓ）」をもたらし、それにおいてはコスト関数が情報の内容となる。生産計画は、その出力がシステム・モデルにおける不確実性を最大限に低減すると好ましい。
【００１０】
図２を参照して図１のパーベイシブ・モデル適応システム１００のプランナ１０２についてより詳細に述べる。上で考察したとおり、プランナ１０２は、物理的なシステム（図１の符号１０８）による高い生産性を可能にし、かつモデル適応エンジン（図１の符号１

０６）が物理的なシステム（図１の符号１０８）についての情報を収集し、それに応じてシステム・モデル（図１の符号１０４）を適応させることを可能にする生産計画１１０を作成するべく適応される。プランナ入力１１２は、システム・モデル（図１の符号１０４）に基づいて物理的なシステム（図１の符号１０８）の現在の状態または「信念」（たとえば、評価および不確実性）を含む。プランナの出力１１０は、生産および学習両方の到達目標のための最適化された生産計画である。

【００１１】

プランナ１０２自体は、情報評価基準モジュール２０６、制約条件計算モジュール２０４、およびサーチ・モジュール２０２を含むいくつかの構成要素からなる。

【００１２】

情報評価基準モジュール２０６は、サーチ・モジュール２０２にヒューリスティクス（規則または評価基準）２１０のセットを提供する。ヒューリスティクス２１０のセットは、任意の所定の生産計画Ｐが最終的にモデル適応エンジン（図１の符号１０６）に提供できる情報の内容をサーチ・モジュール２０２が評価することを可能にする。情報評価基準モジュール２０６の出力２１０は、現在の信念入力１１２に依存し、それにおいて現在の信念入力１１２は、システム・モデル（図１の符号１０４）によって提供される基礎をなす物理的なシステム（図１の符号１０８）の表現である。この評価基準はパーベイシブ・モデル適応に特有であり、伝統的な生産計画、すなわちシステム・モデル（図１の符号１０４）の変化に従って評価基準を動的に調整するのではなく短縮された生産時間または最大スループット等のよく理解された評価基準を使用する生産計画とははっきりと異なる。

【００１３】

システム制約条件モジュール２０４は、偶発性および結合性といった物理的なシステム１０８の内部制約に基づいて有向グラフ２０８を作成する。有向グラフ２０８は、その後、サーチ・モジュール２０２によって生産計画１１０の作成に使用される。生産計画１１０は、既知の初期状態２１２（たとえば、生産のための生の材料）から既知の到達目標状態２１４（たとえば、完成された製品）に至る有向グラフ２０８上の経路である。

【００１４】

サーチ・モジュール２０２は、情報評価基準２１０に関する最適実行可能経路について、入力された有向グラフ２０８上のサーチを行う。以下で説明するとおり、任意の所定の経路Ｐの情報内容は、Ｐ内のすべての構成要素（状態）に依存し、そのことがこのサーチを指数関数的に複雑な問題にする。したがって取り組むべき問題は、情報価値のある計画を与える計算的に効率的なサーチ・ストラテジ（探索戦略）を見出すことである。１つの実施形態においては、最良優先サーチ・ストラテジ（Ａ＊）が使用される。最良優先アルゴリズムは、有望な部分的計画（情報価値のある計画を作り出すと予測されるもの）の移動境界を維持し、その部分的計画を、予測されるもっとも高い情報内容を用いて到達目標状態２１４に到達するまで拡張する。サーチ・モジュール２０２は、サーチの案内に使用されるべきヒューリスティクス２１０を決定する。その種のヒューリスティクスの生成に、どのように情報評価基準が使用されるかをより詳細に以下に示す。

【００１５】

生産システム１０８の動的な性質は、プランナ・アルゴリズムに実質的な複雑性を追加する。たとえば生産システム１０８の構成要素が古くなると、それの振る舞いがオリジナルのモデルから逸れることがあり、したがって構成要素の振る舞いを、学習を介し、時間をかけて追跡する必要性がある。これは、プランナ１０２が動的であることを意味し、時間ｔにおける信念を前提として、プランナ１０２は、信念１１２を修正する出力を作り出すことになる次の最適（または、ほぼ最適）経路$P^{(t)}$のために計画する。修正された信念は、その計画が生産システム１０８によって実施された後、時間（ｔ＋１）にプランナにフィードバックされる。

【００１６】

図３を参照して、パーベイシブ・モデル適応を使用する一例の印刷システムについて述べる。

【００１７】
モジュラ・プリンタ３００は、パーベイシブ・モデル適応における問題を図解する具体的な例として与えられている。第１ステップにおいては、シート紙がフィーダ３０２のうちの１つからプリンタ３００の左側に入り、印刷エンジン３０６、反転器３０８、および用紙経路モジュール３１０（図３内の小さい四角によって表される）等の複数の段階の間を通って用紙フィニッシャ（または出力）３０４から右側に出る。モジュラ化された構造は、プリンタ３００が、プリンタ・エンジン３０６うちのいくつかが故障するか、または用紙経路モジュール３１０が誤動作する（すなわち、紙詰まり）ことがあっても連続的に印刷することを可能にする。プランナ（図１の符号１０２）のタスクは、印刷システム３００を通ってシートを移動させて要求された出力を生成する一方、同時にモデル適応エンジン（図１の符号１０６）によってシステム・モデル（図１の符号１０４）の更新に使用されることが可能な有用な情報を生成する「計画」と呼ばれる動作のシーケンスを見つけることである。

【００１８】
この印刷システムにおいて、各動作（すなわち、計画の中のステップ）ｉは、動作遅延として知られるいくらかの時間θ_iをシート紙の取り扱いに費やす。モジュール３０６，３０８，３１０は、たとえば機械的構成要素（ばね、ローラ等々）が正常損耗および裂けにより損耗するに従って時間とともに低下する。結果として、通常は動作遅延｛θ_i（ｔ）｝が増加する。モデル‐ベースのプランナは、動作遅延の静的イメージを仮定すると働かなくなるであろう。たとえばあらかじめ指定された時間量の中でシート紙がフィーダからフィニッシャに進むことを必要とする計画は、マシンが新しいうちは実行可能であるが、後になると経時による構成要素の通常の劣化に起因して実行不可能となることがある。したがって、生産システム１０８についてこれらの動作遅延を追跡し続けることは重要である。

【００１９】
モデル・パラメータ（状態）のドリフトの追跡には、２つの項目、すなわち（１）基礎をなす状態（この場合は動作遅延）が時間とともにどのように漸進的に変化するかを指定するダイナミクス・モデル、および（２）基礎をなす状態の観察に関係する観察尤度モデルが必要である。ダイナミクス・モデルを次に示す。

【数１】

$$\theta_i(t) = \begin{cases} \theta_i(t-1) + \delta_i + w_i(t) & \text{for } i \in P \\ \theta_i(t-1) + w_i(t) & \text{for } i \notin P \end{cases} \quad (1)$$

【００２０】
動作遅延θ_i（ｔ）は、２つの要因、すなわち（１）計画Ｐ内でモジュールｉが使用される場合には損耗関連の増分δ_i、それ以外はゼロ、および（２）ランダム・ドリフトw_i（ｔ）によって影響を受ける。観察は、生産におけるすべてのモジュールにわたって合計される合計処置時間、および次の観察モデルの中で示されるランダム観察ノイズｎ（ｔ）である。

【数２】

$$y(t) = \sum_{i \in P} \theta_i(t) + n(t) \quad (2)$$

【００２１】
さらにまた、遅延増分δ_iはアプリオリ（ａ　ｐｒｉｏｒｉ）に既知であることが仮定される。特定の実施形態においては、この例示的な方法およびシステムの実装に先行して、またはそれと同時的にδ_iを学習することができる。

【００２２】
この例は、モジュラ印刷に特有であるが、パーベイシブ・モデル適応の概念は一般的で

あり、多様な問題に適用できる。たとえば、プリント回路生産の中で同じ概念を使用することが可能である。プリント回路生産では、動作が、金属基板に材料（酸またはその類）を堆積することによってエッチング処置に寄与する。観察される金属箔内のエッチング深度は、すべての関連する動作の効果の総合である。より一般的に言えば、ここで与えられているテクニックは、線形ダイナミクスおよび観察モデルを伴う任意のシステムに直接拡張できる。概念的なレベルにおいて、式（１）は、特定の計画Ｐに関連するモジュールおよび関連しないモジュールのための異なるドリフト・パターンを記述し、式（２）は、観察をモデル・パラメータに関係させる観察モデルを記述する。それらの両方が線形である限り、詳細な数学的形式は変化するが、ここで述べられているテクニックが適用できる。実際、多くのシステムは、線形モデルによって良好に表現することが可能である。線形化テクニックは、実世界のシステムの近似に広く使用されてきた。

【００２３】

図４を参照して例示的なパーベイシブ・モデル適応システム４００について述べる。システム４００は、初期システム・モデル４０４および初期生産計画４０６を受信するための入力デバイス４０２を含む。入力に先行して初期システム・モデル４０４および初期生産計画４０６を、ＲＯＭまたはＲＡＭドライブ等の任意の適切な有体の媒体内に格納するか、または搬送波の形式で、たとえばインターネットまたはＬＡＮを介してシステム内に入力することができる。代替としては、初期システム・モデル４０４および初期生産計画４０６がコンピューティング・デバイス４００自体の中で生成される。入力は、モデム・リンク、有線または無線接続、ＵＳＢポート、フロッピー（登録商標）またはハード・ディスク受け入れ部、またはこれらの類を含むことができる。

【００２４】

システム４００は、初期システム・モデル４０４および初期生産計画４０６の処理の間に使用するためのデータ・メモリ４０８を含む。システムのメイン・メモリ４１０は、モデル適応エンジン１０６、システム・モデル・モジュール１０４、および、制約条件モジュール２０４、情報評価基準モジュール２０６、およびサーチ・モジュール２０２を含むプランナ・モジュール１０２を格納する。モデル適応エンジン１０６は、生産システム１０８のセンサ読み取り値に基づいて更新された状態パラメータを用いてシステム・モデル１０４を更新する。システム・モデル・モジュール１０４は、モデル適応エンジン１０６から受信された情報に基づいてシステム・モデルを更新する。システム・モデル自体は、システム・モデル・モジュール内、またはシステム・モデル・モジュール１０４によってアクセス可能な任意のそのほかの領域内に格納できる。システム・モデル１０４は、生産システム１０８について真であると考えられていることの表現である。プランナ・モジュール１０２は、生産システム１０８による高い生産性を可能にし、かつモデル適応エンジンが、モデル適応を容易にするために生産システム１０８についての情報を収集することを可能にする生産計画を作成する。プランナ１０２内においては制約条件モジュール２０４が、偶発性および結合性といった生産システム１０８の既知の内部制約に基づいて有向グラフを作成する。情報評価基準モジュール２０６は、システム・モデル１０４からの入力「現在の信念」に基づいてヒューリスティクス（規則または評価基準）のセットをサーチ・モジュール２０２に提供する。たとえばヒューリスティクスは、１つの経路Ｐ１によって得られる情報（下記の式（６）のε）が異なる経路Ｐ２によって得られる情報より大きいと示すことができる。サーチ・モジュール２０２は、情報評価基準モジュール２０６からヒューリスティクスを、制約条件モジュール２０４から有向グラフを受信する。サーチ・モジュール２０２は、その後、最良の生産結果をはじめシステム・モデル・モジュール１０４のための最良の情報をもたらす最適実行可能経路について、入力された有向グラフ上のサーチを行う。

【００２５】

モデル適応エンジン１０６およびモジュール１０４，１０２，２０４，２０６，および２０２は、ハードウエアもしくはソフトウエアまたはこれらの組み合わせとして実装できる。例示的な実施形態においては、構成要素１０２，１０４，１０６，２０２，２０４，

２０６が、コンピュータ・プロセッサ４１２によって実行されるメイン・メモリ４０６内に格納されたソフトウエア・インストラクションを包含する。コンピュータのＣＰＵ等のプロセッサ４１２は、メモリ４１０内に格納された処理インストラクションの実行によってコンピュータ・システムの全体的な動作をコントロールできる。コンピュータ・システムの構成要素４１０，４０８，４１２は、データ・コントロール・バス４１４によって接続できる。

【００２６】

システム４００は、生産計画４１８等の処理済みのデータを出力する入力／出力デバイス４１６を含む。例示的な出力デバイス４１６は、有線または無線リンクによって生産システム１０８にリンクされる。生産システム１０８は、１つまたは複数の生産計画４１８および観察データ４２２をパーベイシブ・モデル適応システム４００に、生産計画４１８を実行させた後に入力することができる。

【００２７】

認識されるであろうが、パーベイシブ・モデル適応システム４００は、パーソナル・コンピュータ、ＰＤＡ、ラップトップ・コンピュータ、サーバ・コンピュータ、またはこれらの組み合わせといった１つまたは複数のコンピューティング・デバイスを包含できる。メモリ４０８、４１０は、一体または別々であるとしてもよく、ランダム・アクセス・メモリ（ＲＡＭ）、読み出し専用メモリ（ＲＯＭ）、磁気デバイスまたはテープ、光ディスク、フラッシュ・メモリ、またはホログラフ・メモリ等の任意のタイプのコンピュータ可読媒体を表すことができる。１つの実施形態においては、メモリ４０８、４１０がランダム・アクセス・メモリと読み出し専用メモリの組み合わせを包含する。いくつかの実施形態においては、プロセッサ４１２およびメモリ４０８および／または４１０を単一チップ内で結合できる。

【００２８】

図５を参照して例示的なパーベイシブ・モデル適応方法を述べる。この方法は、図４で詳説した例示的なシステム上において実施できる。この方法は、ステップ５００において開始する。

【００２９】

ステップ５０２において、初期システム・モデル４００および初期生産計画４３０が作成される。初期システム・モデル４００および生産計画４３０は、生産システム１０８について利用可能な最良の情報に基づく。システム・モデル４００が正しくない場合であっても、時間をかけて、複数の反復の後に訂正されることになる。

【００３０】

ステップ５０４においては、初期システム・モデル４００および初期生産計画４３０が入力４０２に提供される（それらがまだ作成されてなく、システム４０４に保存されていない場合）。

【００３１】

ステップ５０６においては、モデル適応エンジン１０６、システム・モデル・モジュール１０４、およびプランナ・モジュール１０２がすべて、入力された初期システム・モデル４００および初期生産計画４３０内に与えられた値を用いて初期化される。この初期化段階の間にモジュール１０６，１０４，および１０２が、初期システム・モデル４００または初期生産計画４３０に対して何らかの変更を行うことはない。

【００３２】

ステップ５０８においては、プランナ・モジュール１０２によって作成された生産計画４３２が、入力／出力デバイス４２４を介して生産システム１０８に送信される。

【００３３】

ステップ５１０においては、生産システム１０８がプランナ・モジュール１０２によって作成された生産計画４３２を実行する。生産計画４３２が実行されている間は、生産システム１０８内に配置されたセンサが観察データを収集する。

【００３４】

ステップ５１２においては、生産システム１０８が、観察データ４３４および（オプションとして）生産計画４３２をパーベイシブ・モデル適応システム４０４に、入力／出力デバイス４２４を経由して返す。パーベイシブ・モデル適応システム４０４に生産計画４３２が返されない場合には、システム４０４が、最後に生成された生産計画４３２が使用されて観察データ４３４が作り出されたと仮定するものと仮定される。

【００３５】

ステップ５１４においては、生産システムからの入力４３２，４３４がバス４２２を介してメモリ４０６，４２８に転送される。モデル適応エンジン１０６は、その後、入力データ４３２，４３４を処理し、システム・モデル１０４に対する変更を計算する。

【００３６】

ステップ５１６においては、モデル適応エンジン１０６が、計算された変更（図１の符号１１４）をシステム・モデル・モジュール１０４に送信する。

【００３７】

ステップ５１８においては、システム・モデル・モジュール１０４がシステム・モデルを更新し、そのシステム・モデル（すなわち「現在の信念」）（図１～図２の符号１１２）をプランナ・モジュール１０２に送信する。

【００３８】

ステップ５２０においては、プランナが、システム・モデル・モジュール１０４によって提供された現在の信念１１２に少なくとも部分的に基づいて新しい生産計画４３２を作成する。この方法は、その後ステップ５０８にループ・バックして継続する。

【００３９】

図５に図解されている方法は、コンピュータ上で実行できるコンピュータ・プログラム製品の中に実装できる。コンピュータ・プログラム製品は、コントロール・プログラムが記録されるディスクまたはハード・ドライブ等の有体のコンピュータ可読記録媒体とすることができる。一般的な形式のコンピュータ可読媒体は、たとえばフロッピー（登録商標）・ディスク、フレキシブル・ディスク、ハード・ディスク、磁気テープまたは任意のそのほかの磁気ストレージ媒体、ＣＤ‐ＲＯＭ、ＤＶＤまたは任意のそのほかの光学媒体、ＲＡＭ、ＰＲＯＭ、ＥＰＲＯＭ、フラッシュＥＰＲＯＭまたはそのほかのメモリ・チップまたはカートリッジ、または任意のそのほかの、コンピュータ読み出し可能、および使用可能な媒体を含む。それに代えて、データ信号としてコントロール・プログラムが埋め込まれる送信可能な搬送波、たとえば無線波および赤外線データ通信の間に生成されるような音響または光の波等の送信媒体およびこれらの類が提供されることもある。初期システム・モデルおよび生産計画が、その種の有体の媒体のうちの１つまたは複数の中に埋め込まれることもある。

【００４０】

例示的な方法は、１つまたは複数の汎用コンピュータ、専用コンピュータ（１つまたは複数）、プログラムされたマイクロプロセッサまたはマイクロコントローラおよび周辺集積回路要素、ＡＳＩＣまたはそのほかの集積回路、デジタル信号プロセッサ、ハードワイヤード電子または論理回路、たとえばディスクリート素子回路、ＰＬＤ、ＰＬＡ、ＦＰＧＡ、またはＰＡＬといったプログラマブル論理デバイス、またはこれらの類の上で実装できる。概して言えば、図５に示されたフローチャートを実装できる有限状態マシンを実装できる任意のデバイスを使用してパーベイシブ・モデル適応のための方法を実装することが可能である。

【００４１】

図６を参照して、多様な製品を生成できる生産システムおよびモデル‐ベースのコントロール・システムを、図解目的のためのラベルを付けた例示的な実施形態の対応するモジュールとともに示す。図６の生産システムは、例示的な実施形態の生産システム１０８と相関する。図６の多目的プランナ、プラント・モデル、およびモデル適応エンジンは、図１の中で述べられている例示的な実施形態のプランナ１０２、システム・モデル１０４、およびモデル適応エンジン１０６にそれぞれ相関する。

【００４２】
この出願のシステムおよび方法を、次にさらに詳細に述べる。
【００４３】
［１．　情報評価基準］
モデル適応の到達目標は、基礎をなすモデル・パラメータ（例における動作遅延｛θ_i（ｔ）｝）を生産計画出力ｙ（ｔ）から評価することである。鍵となる論点は、動作遅延パラメータのドリフトの追跡にもっとも良好に働く生産経路Ｐはどれか、ということである。これは、遅延パラメータ内の不確実性の考察によって取り組むことが可能であり、すなわち生産計画Ｐは、それの観察ｙ（ｔ）が不確実性を低減する場合に「情報価値がある」となる。
【００４４】
［１．１　情報内容］
説明の便宜のためにベクトル標記Θ（ｔ）＝（θ_1（ｔ），θ_2（ｔ），．．．，θ_M（ｔ））を使用する。モデル（１）および（２）は、次のとおりに書き直すことができる。
Θ（ｔ）＝Θ（ｔ－１）＋Δ（ｔ－１）＋ｗ（ｔ）　　（３）
ｙ（ｔ）＝ＨΘ（ｔ）＋ｎ（ｔ）　　（４）
【００４５】
ここでＨは、動作ｉが経路Ｐ内に含まれるか否かを示すバイナリ表示ベクトルであり、すべてのｉ∈ＰについてＨ$_i$＝１、かつそのほかについて０となる。Δは、増分のベクトル、すなわちΔ＝（$\delta_1 H_1$，$\delta_2 H_2$，．．．，$\delta_M H_M$）^{T}である。単純にするために、さらに、プロセス・ノイズｗ（ｔ）および観察ｎ（ｔ）はガウス分布であると仮定する。これらの仮定の下では追跡問題が比較的単純であり、カルマン・フィルタ（Ｋａｌｍａｎ　ｆｉｌｔｅｒ）を最適に使用して追跡できる。
【００４６】
カルマン・フィルタは、Θ（ｔ）における不確実性、すなわち共分散行列
【数３】

$$R_\theta^t$$

を時間とともに再帰的に更新する。この再帰は、次のとおりである。ここで、時間ｔ－１において
【数４】

$$R_\theta^{t-1}$$

が与えられるとする。不確実性は、ドリフトｗに起因して増大する。時間ｔにおいて予測される共分散が、ドリフト共分散によって拡大され、
【数５】

$$\overline{R_\theta^t} = R_\theta^{t-1} + \Sigma_w.$$

となることは容易に示される。その後、新しい観察ｙ（ｔ）が作られ、不確実性を低減する情報をもたらす。これが不確実性を
【数６】

$$R_\theta^t = (I - KH)\overline{R_\theta^t}$$

に圧縮するが、これにおいてＫはカルマン利得であり、Ｈおよび
【数７】

$$\overline{R_\theta^t}$$

から導き出せる。その後、この再帰を反復する。カルマン・フィルタは、この種の不確実

性の拡大と縮小の間において振動する。不確実性を定量化する１つの周知の方法は、共分散行列のトレース（対角成分の和）

【数８】

$$trace(R_\theta^t)$$

である。任意の所定の生産計画Ｈについて（標準カルマン・フィルタ代数に従って）それを示すことは簡単である。

【数９】

$$trace(R_\theta^t) = trace(\overline{R_\theta^t}) - \frac{||H\overline{R_\theta^t}||^2}{H\overline{R_\theta^t}H^T + \sigma_n^2} \qquad (5)$$

【００４７】

注意されたいが、安定項

【数１０】

$$trace(\overline{R_\theta^t})$$

は、計画Ｈの選択によらず、一定である。したがって不確実性を最小化するために、（最大化されるべき）情報内容は次のとおりに定義される。

【数１１】

$$\mathcal{E} = trace(\overline{R_\theta^t}) - \frac{||H\overline{R_\theta^t}||^2}{H\overline{R_\theta^t}H^T + \sigma_n^2} \qquad (6)$$

【００４８】

これについても注意が必要になるが、情報は、予測される共分散

【数１２】

$$\overline{R_\theta^t}$$

に依存する。ここで、σ_nは測定ノイズｎの標準偏差である。

【００４９】

別の方法は、情報理論から情報評価基準を導き出す。情報内容は、観察ｙを前提とするΘの条件付きエントロピを使用して測定可能であり、情報理論においては、観察ｙを前提とするΘを完全に記述するビット数となる。この条件付きエントロピが

【数１３】

$$\det(R_\Theta^t)$$

であると示すことは容易であり、これは本質的に式（６）に類似である。

【００５０】

情報内容εが与えられているとき、プランナ１０２の到達目標は、生産計画Ｐまたは等価的にビット・ベクトルＨを見つけ、生産システム１０８上において計画Ｐを実行させた後にもたらされる情報内容を最大化することとなる。情報内容の評価は容易であるが、サーチは困難である。実際問題として、Ｈが従わなければならないモジュールの結合性および動作の前提条件に関する制約が存在する。しかしながら洞察を得るために、まず、はるかに単純な問題、すなわち、制約条件がないとすれば何が情報内容を最大化する最良のＨであるか、に取り組む。

【００５１】

たとえば、２つの動作ＡおよびＢだけを有する簡略化された場合を考える。一般性を失うことなく

【数１４】

$$\overline{R_\theta}^t = \begin{pmatrix} 1 & \rho \\ \rho & 1 \end{pmatrix}$$

が仮定される。

【００５２】

ここでρは、－１≦ρ≦１を取る相関係数であり、ＡおよびＢが独立であるときにのみゼロとなる。このシステムについて、プランナ１０２は、次の表１（計画の選択肢および情報内容）にリストされている３つの選択肢を有する。

【表１】

計画	H	情報内容
A	$[10]$	$\mathcal{E}_A = \frac{1+\rho^2}{1+\sigma_n^2}$
B	$[01]$	$\mathcal{E}_B = \mathcal{E}_A$
AB	$[11]$	$\mathcal{E}_{AB} = \frac{2(1+\rho)^2}{2+\sigma_n^2}$

【００５３】

以下のことに注意されたい。

－　ρ＝０のとき、情報内容に関して経路ＡＢが最良の選択肢となることは明らかである。

－　ρが－１に近いときは、経路Ａ（または、等価的に経路Ｂ）が経路ＡＢより好ましい。

－　ρの切り換えポイントは、

【数１５】

$$\sigma_n^2$$

によって決定される。正確な切り換えポイントの指定は容易である。さらにまた、$\sigma_n \to 0$となるとき、切り換えポイントがρ＝０となることにも注意が必要である。

【００５４】

ＡおよびＢが当初独立である状況について、上の分析はＡＢが最適であることを示唆する。この経路を採用すると、ＡおよびＢにわたる遅延の和が２つのモジュールを負に相関させることが観察される。次のステップは、この負の相関に起因してＡＢより経路Ａ（または、等価的にＢ）を選ぶことになる。Ａ（またはＢ）の個別の遅延の観察は、ＡとＢの間における相関を減少させ、したがってρを小さくする。いくつかの時点において、経路ＡＢが再び選ばれることになる。経路サーチは、長い経路ＡＢと個別の構成要素（ＡまたはＢ）の間を交互に行うことになる。

【００５５】

［１．２　ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔ：経路の制約なしにＨを描くための貪欲なストラテジ］

情報内容の式（６）の構造に注目されたい。Ｈはビット・ベクトルであり、動作が生産計画に関連するか否かに応じて０または１の値を取る。二値化されたＨは、計算を有意に簡略化する。分子の中の項

【数１６】

$$H\overline{R_\theta}$$

は、共分散行列

【数１７】

$$\overline{R_\theta}$$

の選択された行の和であり、インデクスｉ∈Ｐを伴う行にわたって和を求める。分母の中の項

【数１８】

$$H\overline{R_\theta}H^T$$

は、グリッド和（ｇｒｉｄ－ｓｕｍ）であり、すべてのグリッド・ポイント｛（ｉ，ｊ），ｉ，ｊ，∈Ｐ｝にわたって和を求める。

【００５６】

プランナ１０２は、与えられた情報評価基準を用いて最適経路のためにどのようにサーチするかを決定する必要がある。このタスクについては、Ｈに係るすべての制約を無視し、ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔと名付けられた貪欲な（ｇｒｅｅｄｙ）アルゴリズムを実施する。ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔは、式（６）によってもたらされる情報内容を最大化する計画Ｐを描く貪欲なストラテジである。このアルゴリズムは、空の計画Ｐ＝φを伴って開始する。その後、経路内に任意の単一モジュールｋを含めることの利益を比較し、最大のε値を伴う１つを貪欲に選択することによってＰに追加する動作を漸増的に決定する。この手順が、すべての未決定の動作を考察しながら、さらに任意の単一動作を含めると全体的なεを減少させることになるまで反復される。これをアルゴリズム１（表２：ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔのアルゴリズム）に図解する。

【表２】

Input: Covariance Matrix $\overline{R_\theta}$, noise variance σ_n^2
Output: (1) Optimal bit vector H and (2) the corresponding information content $\mathcal{E} = -\frac{\|H\overline{R_\theta}\|^2}{H\overline{R_\theta}H^T+\sigma_n^2}$

begin
  Included node set: $P \leftarrow \emptyset$
  Undecided node set: $\mathcal{U} \leftarrow \mathbb{A}_{sys}$
  Initial score: $e \leftarrow 0$
  while $\mathcal{U} \neq \emptyset$ **do**
    for *all* $i \in \mathcal{U}$ **do**
      Construct P_{tmp} by including i into P;
      Compute information content e_i using P_{tmp};
    end
    if $\max(e_i) > e$ **then**
      Find the action i^* producing $\max(e_i)$;
      $e \leftarrow \max(e_i)$;
      Modify set: $P = P \cup i^*$, and $\mathcal{U} \leftarrow \mathcal{U} \backslash i^*$;
    else
      $\mathcal{U} \leftarrow \emptyset$
    end
  end
  Generate bit vector H from plan P;
  Output bit vector H and information score $\mathcal{E} \leftarrow e$.
end

【００５７】

ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔは、本質的に貪欲である。ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔによってもたらされた結果は、実験室環境における真の最適計画（「託宣計画（ｏｒａｃｌｅ　ｐｌａｎ）」）と比較された。この比較を行うためにＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔの貪欲なストラテジが実装されて、ランダムに生成された共分散行列のセットに適用される。平均すると、2^M（シミュレーションにおいてはＭ＝１０）の可能な計画のうち、計画の約７％が、ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔによって選び取られた計画より良好である（より大きいεを与え

る）。託宣計画は、ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔによってもたらされるより概略で５５％大きいεを与える。全体として、ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔは、情報内容を評価する拙速な（ｑｕｉｃｋ－ａｎｄ－ｄｉｒｔｙ）方法であると考えることができる。ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔの計算の複雑性は、Ｍを動作の総数とするとき、Ｏ（M^2）となる。これは、複雑性Ｏ（2^M）を有する、すべての可能な計画を比較する愚直なストラテジよりはるかに効率的である。節約は明らかである。さらにまた、εの計算は漸増的である。これは、分子が行の和となり、したがって、新しいモジュールの追加が、既存の行の和に対する新しい行の追加に対応するという計算構造に起因する。同様に分母は、Ｒのグリッド和となり、類似の漸増態様で計算が可能である。

【００５８】

ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔアルゴリズムは、完全に到達可能なグラフを仮定し、ネットワークの制約に関係しない。実際、ノードは、ノードのサブセットだけに到達できる。その種の経路設定の制約は、生産計画の選択肢を制限する。ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔによって生成される最適（実際は最適に満たない）計画は、実行可能でないことがある。

【００５９】

［２．　サーチ］

パーベイシブ・モデル適応の目的は、モデル適応エンジン１０６の信念を使用して生産計画に影響を及ぼし、個別の動作の遅延についての追加の情報を得ることである。

【００６０】

動作が条件を有する計画システムにおいては、条件が満たされる場合にだけ動作が適用できる。したがって、基礎をなすグラフは、ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔにおいて仮定されていたように完全に接続されてはいない。情報評価基準（６）を最大化する計画を見つけ出すための適切なアルゴリズムを見つけるために、動作条件の制約を前提として最良優先サーチ・アルゴリズムが設計された。最良優先サーチ・アルゴリズムは、最良ノードの境界を移動し続け、到達目標状態に到達するまで拡張する。アルゴリズムは、式（６）において計算された情報評価基準に基づいてノードの拡張および再順序設定を行う。

【００６１】

最良優先サーチは、境界内のそのほかのサーチ・ノードに関してノードの品質を評価するサーチ・ノード評価関数を必要とする。その評価関数が最適であれば、最良優先サーチは最適となる。情報内容を最大化するために、計画によって収集される情報利得の評価が必要になる。したがって、３つのセットの動作があらかじめ計算され、それに応じてＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔ手順が修正される。

【００６２】

３つの動作セットは次のとおりである。

$Succ_a$　後続する動作のセット

Pre_a　先行する動作のセット

$NC_a = A_{sys} \setminus (Succ_a \cup Pre_a)$　接続されていない動作のセット　（６）

【００６３】

ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔアルゴリズムは、修正された後、部分的な計画Ｐおよびその計画内の最後の動作a_lを前提として、どの程度多くの情報が収集可能であるかについて最適に近い評価を与えることになる。アルゴリズムは、入力されたビット・ベクトルＨを次のように変更することによって修正される。

$i \in A_{sys} \setminus (S_{ai} \cup P)$について$H_i = 0$　到達可能でない動作

$i \in P$について$H_i = 1$　すでに訪れた動作

$i \in S_{ai}$について$H_i = -1$　前方にある到達可能な動作　（７）

【００６４】

ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔを使用して、式（６）によって計算された情報内容を最大化するために含ませる未決定の動作（$H_i = -1$を伴うもの）を選択することができる。ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔアルゴリズムは、ここで未決定の動作ａが選択された場合に、それに対応するNC_a内の動作が免除（$H_i = 0$にセット）されるように修正される。

【００６５】
図７の単純な例のグラフを考察する。計画Ｐは、状態Ａ（７００）において開始し、到達目標の状態Ｇ（７０２）に到達しなければならない。当初、状態Ａ（７００）において開始する計画Ｐは、次の状態のための選択肢を２つ、すなわちＢ（７０４）またはＣ（７０６）を有する。
【００６６】
－　Ｂ（７０４）に進む場合：訪問済み動作セットは、$P=\{a_{A,B}\}$である。到達可能なセットは、$Succ_a=\{a_{B,D}, a_{B,E}, a_{D,G}, a_{E,G}\}$である。到達可能でないセットは、$\{a_{A,C}, a_{C,E}\}$である。ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔを使用して情報内容を評価することが可能であり、それをε_{AB}と表す。
－　Ｃ（７０６）に進む場合：訪問済み動作セットは、$P_2=\{a_{A,C}\}$である。到達可能なセットは、$Succ_a=\{a_{C,E}, a_{E,G}\}$である。到達可能でないセットは、$\{a_{A,B}, a_{B,D}, a_{B,E}, a_{D,G}\}$である。ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔを使用して情報内容を評価することが可能であり、それをε_{AC}と表す。
【００６７】
$\varepsilon_{AB}>\varepsilon_{AC}$であれば、Ｂ（７０４）に進むことがより良好な選択肢となる。最良優先サーチは、経路ＡＢを最初に拡張し、並べ替えられたリストとして境界｛ＡＢ，ＡＣ｝を維持する。このポイントにおいて、同じＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔメカニズムを使用して、情報内容ε_{ABD}およびε_{ABE}を計算し、Ｄ（７０８）とＥ（７１０）が比較される。この時点で境界は、それぞれの情報内容の値に基づいて並べ替えられた経路ＡＢＤ、ＡＢＥ、ＡＣを含む。この手順が、計画の到達目標の状態Ｇ（７０２）に到達するまで反復される。
【００６８】
最良優先サーチ・アルゴリズムが使用されているが、最大の最適性が保証されるのではないことに注意する必要がある。その理由は、ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔによって生成される評価が常に許容可能であるとは限らないことにある。許容可能とするためには情報内容を常に過大評価しなければならない。ある意味では、過大評価の傾向があり、最良優先サーチ完全な計画を返すが、ＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔがその完全な計画の制約条件に従わず、その結果、局所的な情報利得の最大点の動作を含み、実行可能な評価より高い評価の情報内容をもたらして評価が停止する。
【００６９】
例示的な実施形態の範囲を限定する意図ではなく、以下の例によりこの方法の実装を実証する。
【００７０】
［例］
パーベイシブ・モデル適応の実際的な利益を評価するために、実世界の状況の中で評価アルゴリズムのＩｎｆｏＣｏｌｌｅｃｔを実装する。既存のモデル－ベースのプランナおよび適応エンジンが適応エンジンと組み合わされ、モジュラ・デジタル印刷機の定義域のモデルの上で試験された。このモジュラ・デジタル印刷機は、複数の経路を伴って設計されており、特殊シート（スポット・カラー）用に特化され印刷エンジンを使用して並列生産を行う。
【００７１】
プランナは、ジョブ・キューからジョブを受信し、ジョブを完成する計画を作成する。その後、その計画を印刷機のシミュレーションに送信する。シミュレーションは、システムを通って移動する用紙の物理的なダイナミクスをモデリングする。このシミュレーション上で実行する計画は、実験室内の物理的なプロトタイプ・マシン上において未修正で実行する。シミュレーションは、ドリフトする動作のセットを前提として計画の観察を決定する。計画が遅延なしに完了され、要求されたフィニッシャ・トレイ内に置かれる場合には、時間内に計画が成功したと言い、それ以外は計画の実行が失敗した、または時間に遅れたと言う。
【００７２】

オリジナルの計画および観察される計画の実行の遅延（遅延がゼロとなることもある）は、適応エンジンに送られる。エンジンは、信念モデルの不確実性を更新する。信念モデル内に不確実性が生じるとき、プランナは、もっとも情報価値のある計画を貪欲にサーチする。計画の提出と観察の受信の間に遅延があることからジョブ・キューからの生産ジョブは、観察が返されるまで情報利得のための最適化を伴うことなしに計画される。これは、生産性を高く維持する。

【００７３】

パーベイシブ・モデル適応の実際的な利益が、２つの実験の中で評価された。実験１においては、４つの異なる情報探索アプローチの情報利得が比較された。実験２は、４つの異なる生産ストラテジの長期生産性を分析した。

【００７４】

［実験１－情報利得］

４つのアプローチの性能は、同一のモデル適応スキームを使用して比較されるが、各アプローチが情報を捜し求める方法に違いがある。

【００７５】

－　正規生産計画（モデル適応のために最適化されていない）を使用して情報を捜し求める正規モデル適応（受動的）。したがってこれは、その情報収集ストラテジにおいて受動的である。

－　システムのすべての構成要素を使用カウントにおいて一様に使用して情報を捜し求める目的を持って生産計画を生成する一様モデル適応。

－　上で詳細に述べたアプローチを使用して情報を捜し求める、情報価値のある生産計画を生成するパーベイシブ・モデル適応。したがってこれは、情報収集のためにもっとも高い不確実性を伴うシステム部分を能動的に突きとめると同時に、生産の到達目標を達成する。

－　上で詳細に述べたアプローチを使用して情報を捜し求める、情報価値のある試験的な計画を生成するが、製品を作り出さない専用モデル適応。専用モデル適応は、パーベイシブ・モデル適応より従うべき制約が少ない（生産の制約がない）。このことは、より大きい計画空間に起因してより情報価値のある計画をもたらす。

【００７６】

実験は、各モデル適応アプローチについて２００回にわたって反復された。各実験の中では、実行持続期間におけるドリフトに６つの動作が選択され、「計画、実行、観察、更新」が４０サイクル実施された。

【００７７】

実験の結果を図８に示す。この図は、実施される「計画、実行、観察、更新」の反復の数をｘ軸上に、共分散行列のトレース

【数１９】

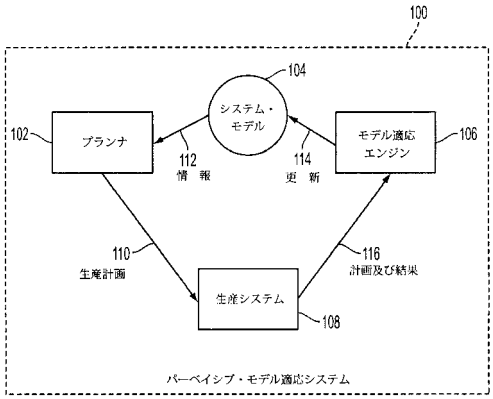
$$(tr(R_\theta^t))$$

として単位時間の平方における不確実性をｙ軸上に示す。不確実性は、ドリフトする遅延を伴う６つの動作によって導入される。正規モデル適応は適応のためにまったく最適化されていないことから、概して、適応エンジンのための充分な情報を提供しない計画を生成する。図８は、不確実性が時間とともに累積されて「正規」が不確実性の限定に失敗することを示す。「一様」は、情報収集のための部分的な最適化に起因して正規モデルよりはるかに良好に働くが、最終的には、不確実性を安定した状態に維持することに失敗する。概していえば、「一様」は、システム内の冗長性が高い場合に失敗することになる。「パーベイシブ」は、システム内に低い不確実性をもたらす情報利得のために生産計画を最適化する。これの上に立つことができるものは「専用」だけであり、それは、より少ない制約に起因する。「専用」は製品をまったく作り出さないことに注意されたい。全体として、有効な情報利得最適化に起因して、「パーベイシブ」および「専用」が不確実性の制御において非常に良好に働くことが示された。

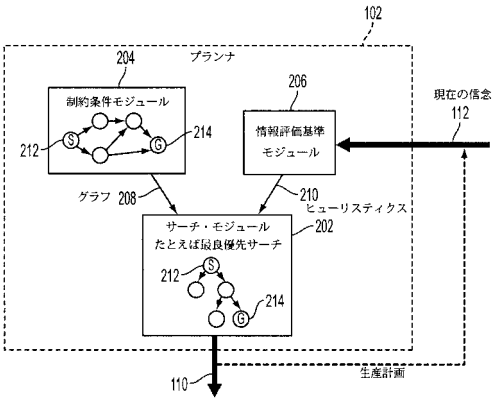
【００７８】
［実験２－長期生産性］
第２の実験においては、４つの生産ストラテジが比較されて、長期生産性におけるそれらの性能が評価される。４つのストラテジは、同一のモデル適応スキームを使用するが、生産および情報を捜し求める方法において異なる。４つの異なるストラテジを説明する前に、最大不確実性レベルｍａｘＵ、すなわちそれを超えると到達目標が生産から情報捜しに切り換えられるレベルを定義する。この切り換えは、障害に起因するダウンタイムを回避する。
【００７９】
－　「正規」の後「専用」。最大不確実性ｍａｘＵに到達するまで「正規」生産を実行させ、到達した時点でストラテジを「専用」の情報捜しに切り換える。
－　「一様」の後「専用」。「一様」生産は、システムのすべての構成要素を一様に（使用カウントによって）使用することをねらいとする。最大不確実性ｍａｘＵに到達するまで「一様」生産を実行させ、到達した時点でストラテジを「専用」の情報捜しに切り換える。
－　パーベイシブ。上で詳細に述べたアプローチを使用して情報を捜し求める、情報価値のある生産計画を生成するパーベイシブ・モデル適応を使用する生産。
－　「正規」の後「パーベイシブ」。最大不確実性ｍａｘＵに到達するまでは「正規」生産、到達した時点でパーベイシブ・モデル適応を使用する生産にストラテジを切り換える。
【００８０】
実験は、各生産ストラテジについて２００回にわたって反復された。各実験の中では、実行持続期間中にドリフトを生じさせるために６つの動作が選択された。各ストラテジは、３０秒の「計画、実行、観察、更新」サイクルを実施した。生産および試験レートは、生産ストラテジの間で変動するべくセットされ、「正規」生産を３．１シート／秒、「一様」生産を２．０シート／秒、「パーベイシブ」生産を１．９シート／秒、および「専用」の情報捜しを２．８テスト・シート／秒とした。「専用」の情報捜しは有効な製品を作り出さないことに注意されたい。「正規」生産は、スループットのために最適化されていることから、もっとも高い生産レートにセットされた。２番目にもっとも高い生産レートは、「専用」の情報捜しが生産の制約に従う必要がないことからそれに与えられた。「パーベイシブ」生産は、情報利得のための最適化の間に生産の制約に従うことからもっとも低いレートを有する。
【００８１】
実験の結果を図９および図１０に図解する。図９は、システム内の不確実性を単位時間の平方における共分散行列のトレースとして示す。４つすべてのストラテジは、パーベイシブ・モデル適応を使用する生産を除き、不確実性の安定状態に到達するまで不確実性が比較的高速に増大する。これは、不確実性がｍａｘＵに到達するとストラテジが「専用」の情報捜しに切り換えられるという事実に起因する。２００の実験にわたって結果が平均されることから、不確実性の安定状態はｍａｘＵの下にとどまる。ｍａｘＵまでの距離は、それらの生産モードにおいてストラテジによって提供される情報利得の量を示す。パーベイシブ・モデル適応は、良好な情報捜しに当てられた強い焦点に起因してｍａｘＵのはるか下にとどまる。
【００８２】
図１０は、生産ストラテジの生産性を時間当たりの生産として示す。結果は、「『一様』の後『専用』」がもっとも低い生産性を有することを示している。これは、ストラテジがスループットまたは情報捜しのいずれのためにも最適化されていないことからもたらされる。「『正規』の後『専用』」および「パーベイシブ」は類似の形で働く。そうではあるものの「『正規』の後『専用』」の生産は高いスループットを有するが、低い情報利得を提供し、「パーベイシブ」は低いスループットを有するが、高い情報利得を提供する。実験では、これらの効果が互いを相殺することがわかる。「『正規』の後『パーベイシブ

』」は、「『正規』の後『専用』」および「パーベイシブ」両方の強みを結合し、もっとも良好に働く。総括して言えば、最良のストラテジは、不確実性が最大限界ｍａｘＵに成長するまでスループットに焦点を当て、その後、不確実性が落ちるまでパーベイシブ・モデル適応によって提供される情報価値のある生産計画に切り換えることとなる。

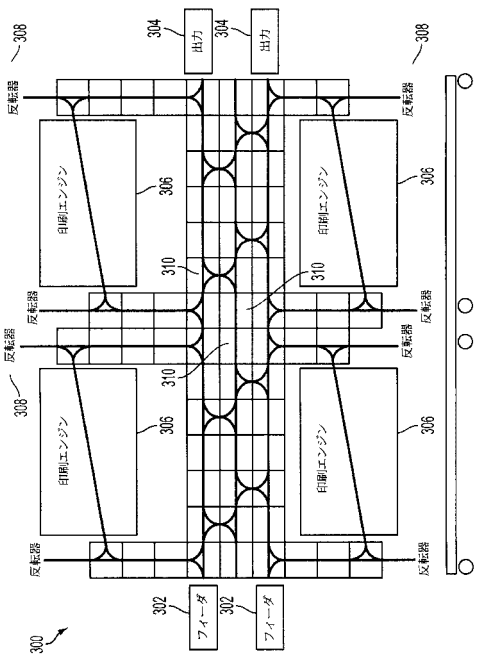
【図１】



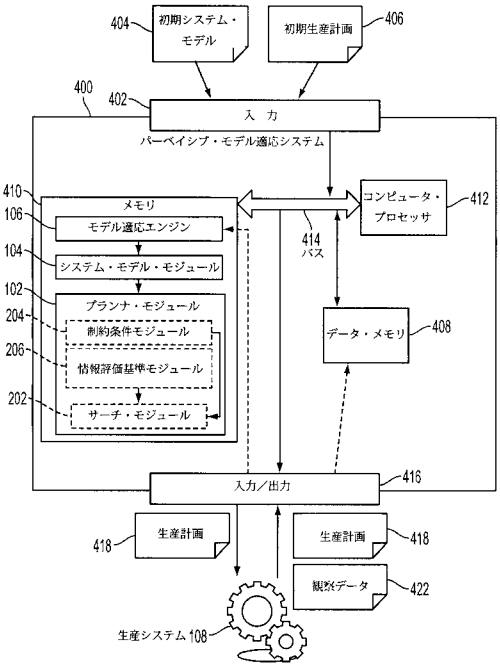
【図２】



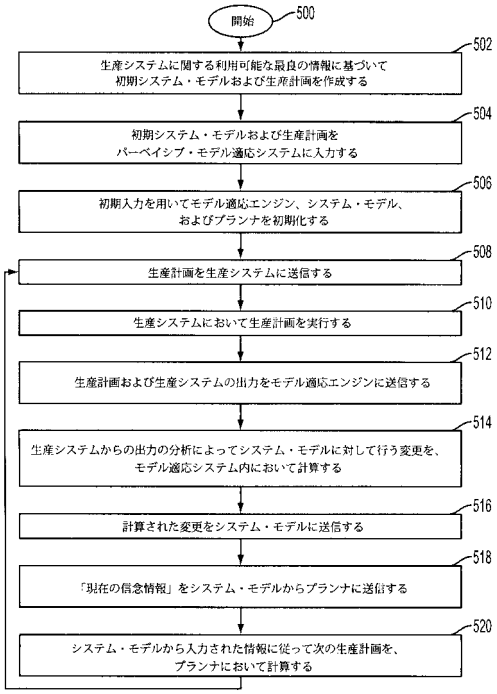
【図３】



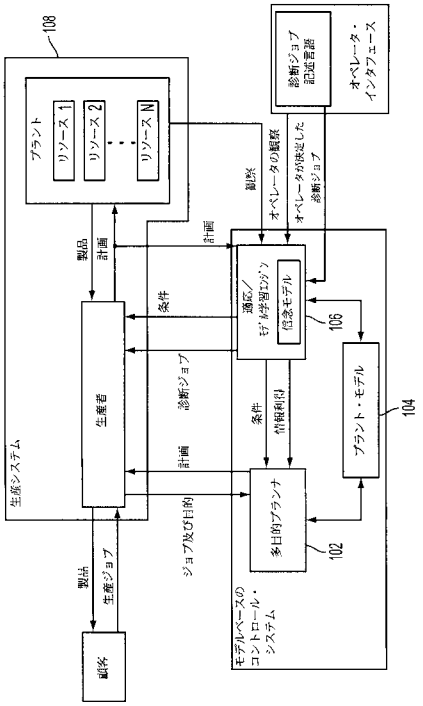
【図４】


初期システム・モデル
404
初期生産計画
406
400
402
入　力
パーベイシブ・モデル適応システム
410
メモリ
106
モデル適応エンジン
104
システム・モデル・モジュール
102
プランナ・モジュール
204
制約条件モジュール
206
情報評価基準モジュール
202
サーチ・モジュール
コンピュータ・プロセッサ
412
414
バス
データ・メモリ
408
入力／出力
416
生産計画
418
生産計画
418
観察データ
422
生産システム 108

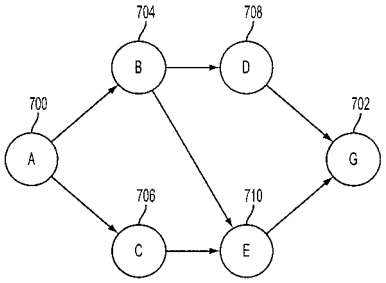
【図５】


開始
500
生産システムに関する利用可能な最良の情報に基づいて初期システム・モデルおよび生産計画を作成する
502
初期システム・モデルおよび生産計画をパーベイシブ・モデル適応システムに入力する
504
初期入力を用いてモデル適応エンジン、システム・モデル、およびプランナを初期化する
506
生産計画を生産システムに送信する
508
生産システムにおいて生産計画を実行する
510
生産計画および生産システムの出力をモデル適応エンジンに送信する
512
生産システムからの出力の分析によってシステム・モデルに対して行う変更を、モデル適応システム内において計算する
514
計算された変更をシステム・モデルに送信する
516
「現在の信念情報」をシステム・モデルからプランナに送信する
518
システム・モデルから入力された情報に従って次の生産計画を、プランナにおいて計算する
520

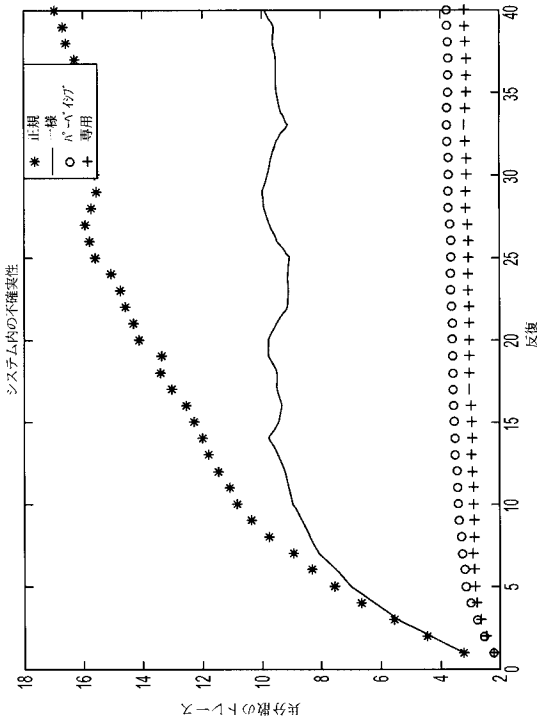
【図６】


108
プラント
リソース 1
リソース 2
リソース N
診断ジョブ記述言語
オペレータ・インタフェース
観察
オペレータが決定した診断ジョブ
製品
計画
計画
条件
適応／ML／学習エンジン
信念モデル
105
生産者
診断ジョブ
条件
情報利得
プラント・モデル
104
計画
多目的プランナ
102
ジョブ及び目的
製法
生産ジョブ
顧客
モデルベースのコントロール・システム
生産システム

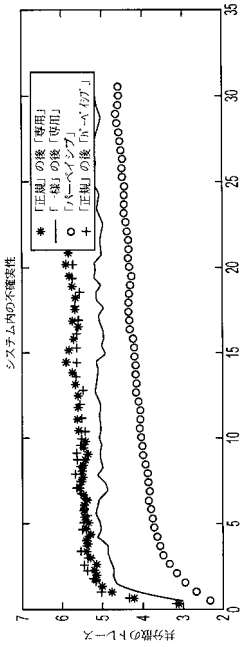
【図７】


704
708
B
D
700
702
A
G
706
710
C
E

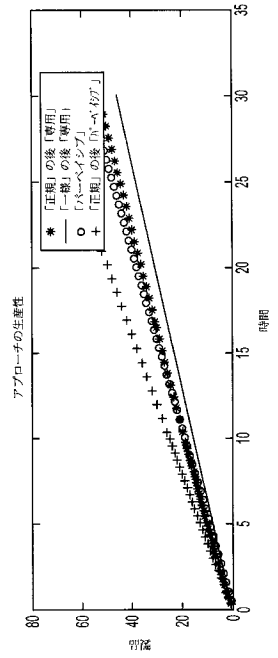
【図８】


＊ 正規
— 一様
○ バーベイグア
＋ 専用
システム内の不確実性
反復
共分散のトレース

【図９】


＊ 「正規」の後「専用」
— 「一様」の後「専用」
○ 「バーベイグア」
＋ 「正規」の後「バーベイグア」
システム内の不確実性
共分散のトレース

【図１０】


＊ 「正規」の後「専用」
— 「一様」の後「専用」
○ 「バーベイグア」
＋ 「正規」の後「バーベイグア」
アプローチの生産性
時間
製品

フロントページの続き

(72)発明者　ジョアン　デクレア
アメリカ合衆国　カリフォルニア　ロス　アルトス　パコ　ドライブ　６８５
(72)発明者　ルーカス　クーン
アメリカ合衆国　カリフォルニア　パロ　アルト　アマランタ　アベニュー　４０２０

審査官　山内　裕史

(56)参考文献　米国特許出願公開第２００８／０１４７２２５（ＵＳ，Ａ１）
特開２００３－２２８４０２（ＪＰ，Ａ）
特開２００２－３１２０２０（ＪＰ，Ａ）
特開２００９－９３１２（ＪＰ，Ａ）
特開２００９－１１６８４２（ＪＰ，Ａ）
国際公開第２００８／１０６０７１（WO，Ａ１）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｇ０６Ｑ　５０／０４