

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2012年11月15日(15.11.2012)



(10) 国際公開番号
WO 2012/153629 A1

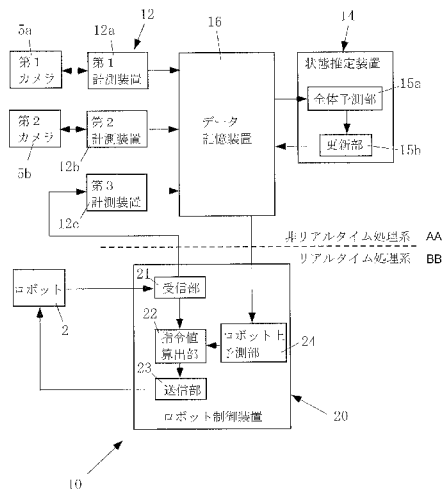
- (51) 国際特許分類:
B25J 13/00 (2006.01) B25J 13/08 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2012/060918
- (22) 国際出願日: 2012年4月24日(24.04.2012)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2011-106822 2011年5月12日(12.05.2011) JP
特願 2011-116883 2011年5月25日(25.05.2011) JP
特願 2011-116663 2011年5月25日(25.05.2011) JP
- (71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): 株式会社 I H I (IHI Corporation) [JP/JP]; 〒1358710 東京都江東区豊洲三丁目1番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人(米国についてのみ): 江本 周平 (EMOTO Shuhei) [JP/JP]; 〒1358710 東京都江東区豊洲三丁目1番1号 株式会社 I H I 内 Tokyo (JP). 林 俊寛 (HAYASHI Toshihiro) [JP/JP]; 〒1358710 東京都江東区豊洲三丁目1番1号 株式会社 I H I 内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 堀田 実(HOTTA Minoru); 〒1080014 東京都港区芝五丁目2番20号建築会館4階 アサ国際特許事務所 Tokyo (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV,

[続葉有]

(54) Title: DEVICE AND METHOD FOR CONTROLLING PREDICTION OF MOTION

(54) 発明の名称: 運動予測制御装置と方法

【図2】



- 2... ROBOT
- 5a... FIRST CAMERA
- 5b... SECOND CAMERA
- 12a... FIRST MEASUREMENT UNIT
- 12b... SECOND MEASUREMENT UNIT
- 12c... THIRD MEASUREMENT UNIT
- 14... STATE-ESTIMATING DEVICE
- 15a... OVERALL PREDICTION UNIT
- 15b... UPDATING UNIT
- 16... DATA STORAGE DEVICE
- 20... ROBOT CONTROL DEVICE
- 21... RECEIVING UNIT
- 22... COMMAND-CALCULATING UNIT
- 23... TRANSMITTING UNIT
- 24... PREDICTION UNIT ON ROBOT
- AA... NON-REAL TIME PROCESSING SYSTEM
- BB... REAL TIME PROCESSING SYSTEM

(57) Abstract: (A) Sensor information is acquired by measuring one or both of a target object and a robot (2) with measuring devices (12a, 12b). (B) The internal states of one or both of the target object and the robot (2) are predicted and updated by a state-estimating device (14) based on the sensor information. (C) The internal states are stored using a data storage device (16). (D) The robot (2) is controlled by a robot control device (20). In (B), the internal states are updated by the state-estimating device (14) with a chosen timing that does not depend on the robot control cycle. In (D), the prediction value necessary for control of the robot is calculated by the robot control device with the periodicity of the control cycle based on the most recent internal states stored in the data storage device (16).

(57) 要約: (A) 対象物とロボット(2)の一方または両方を計測装置(12a、12b)で計測することによりセンサ情報を取得する。(B) センサ情報に基づいて、対象物とロボット(2)の一方または両方の内部状態を状態推定装置(14)により予測して更新する。(C) 内部状態をデータ記憶装置(16)により記憶する。(D) ロボット(2)をロボット制御装置(20)により制御する。(B)において、状態推定装置(14)により、ロボットの制御周期に依らない任意のタイミングで、内部状態を更新する。(D)において、ロボット制御装置により、制御周期で、データ記憶装置(16)に記憶された最新の内部状態に基づいて、ロボットの制御に必要な予測値を算出する。

WO 2012/153629 A1



SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC,
VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保
護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW,
MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラ
シア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨー
ロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE,

ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV,
MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,
SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ,
GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称：運動予測制御装置と方法

技術分野

[0001] 本発明は、ロボットなどを使った自動装置のうち、ワークやロボットなどの運動を予測する運動予測制御装置と方法に関する。

背景技術

[0002] (ロボットの位置を計測してロボットを制御する場合)

ロボット上やロボットの外部に設置したセンサ情報を使って、ロボットの位置や姿勢を算出し、ロボットを駆動制御する制御装置において、ロボットの位置と姿勢の計測に使われるセンサや計測方法としては、以下が一般的である。

(1) ロボット上の内界センサを使う方法。

例えば、ロボット上に設置したジャイロセンサや車輪のエンコーダなどで、ロボットの速度、加速度、角速度などを計測する。ロボット上に設置したステアリング部のエンコーダなどで、ロボットのステア角を計測する。

(2) ロボット上の外界センサを使う方法。

例えば、ロボット上に設置した測距センサ（レーザーレンジファインダ（LRF）、レーザレーダなど）やカメラなどで、ロボット周囲のランドマークの位置や姿勢を計測する。ロボット上に設置したGPSコンパスなどで、ロボットの現在の位置と姿勢の一方又は両方を計測する。

(3) ロボット外の外部センサで計測する方法。

ロボット外部に設置した測距センサやカメラなどで、計測範囲内のロボットの位置や姿勢を計測する。

[0003] 単一のセンサでロボットの位置や姿勢を精度よく求めることは困難なため、上述のセンサや計測方法を複数用いて、得られた複数の計測結果から位置や姿勢を求めることがある。

しかし、以下のような理由で、複数の計測結果を簡単に比較することはで

きない。

(2) (3) で計測される位置と姿勢は、計測するセンサや、特定の点を基点とする座標系で表される相対的な位置と姿勢である。計測座標の基点はそれぞれ異なる上に、ロボット上のセンサの場合は、基点となるロボット自身の位置が不明なため、単純に座標変換等で、これらの計測結果を比較することは難しい。

(1) は、位置や姿勢を直接計測するものではないため、(2) (3) と直接比較できない。

[0004] また、以下で述べるように、全てのセンサ情報を同期して計測することは困難である。したがって、得られた計測結果の計測時刻は、それぞれ異なる場合がある。ロボットの位置と姿勢は時々刻々と変化するため、時刻の揃っていない計測結果を単純に比較することはできない。特にロボットの速度が速い場合などでは、位置と姿勢の変化量が大きいいため、このような問題が起こりやすい。

[0005] a 一般的に、同一ロボット内の内界センサのセンサ情報は同期して取得される。しかし、例えば、異なるロボット間で、1つの同期信号を共有するのは難しい(有線接続が必要)。したがって、複数のロボット間で内界センサの情報を同期するのは困難である。

b (3) のように外部センサを用いる場合も、aと同様に、複数の装置間で同期信号を授受する必要がある場合には、外部センサとロボット上のセンサの同期は困難である。

c (2) や (3) で使われるセンサには、センサそのものの計測時間や、センサから得られたセンサ情報を処理する時間などによる計測遅れがある。したがって、センサで得られる計測結果は、計測遅れの分古いセンサ情報となるため、(1) のような内界センサのセンサ情報と計測時刻が異なる。また、計測対象がセンサの視野から外れる場合があるため、指定した時刻の計測結果が常に得られるとは限らない。

[0006] (移動するワークをハンドリングする場合)

移動するワークをロボットでハンドリングする自動装置では、ロボット上やロボットの外部に設置したカメラなどの視覚センサやレーザーレンジファインダ（LRF）などの測距センサでワークの位置を計測し、その計測結果に基づいてロボットアームを追従制御させる必要がある。

ロボット自身が移動する移動ロボットの場合でも、ロボット上やロボットの外部に設置したセンサで移動ロボットの位置を計測し、計測結果に基づいてロボットを制御する必要がある、同様の技術が用いられる。ロボットの位置を計測する方法には、上述のように、ロボット上のセンサでランドマークとの相対位置を計測する方法や、ロボットの外部に設置したセンサでロボットの位置を直接計測する方法がある。

以下、移動するワークや移動ロボットを単に「移動体」とも呼ぶ。

[0007] 上述したロボットの運動予測制御では、時々刻々と変化する対象物（ワークやランドマーク）やロボット間の相対位置を一定周期（例：30fpsのカメラ）で計測し、計測結果に基づいて、例えばワークにロボットを近づけるような、移動指令がロボットに出力される。

[0008] しかし、計測したワークの位置を目標としてロボットを動作させても、センサの計測遅れ、データの取得遅れ、ロボットの動作遅れなどの制御遅れにより、ロボットが移動するワークに追従できないことがある。

また、視覚センサの場合、センサの計測周期はロボットの制御周期（例：4ms）よりも一般に長いため、ロボットは制御周期ごとに最新の計測結果を得られるわけではなく、その分が計測遅れとなる。特に、画像処理に時間がかかったり、ワークがカメラの視野から外れたりすると、計測結果が更新される周期はさらに長くなり、かつ一定ではなくなる。このように、移動するワークや移動ロボットを扱う装置では、制御遅れによりロボットの追従性能が低下する問題点があった。

[0009] 上述した背景技術についての問題を解決するために、種々の制御手段が既に提案されている（例えば、特許文献1～4）。

[0010] 特許文献1の「3次元運動予測装置」は、単振動を行う対象物の位置デー

タからその運動パラメータを推定し、その将来の位置を予測し、その位置情報を基にマニピュレータにより対象物を把持するものである。

特許文献2の「状態推定手段」は、観測により時系列に入力される観測信号に基づいて、その観測を行ったシステムの内部状態を推定するものである。内部状態とは、対象物の位置、姿勢、振れ角などの状態変数を意味する。

特許文献3の「運動予測装置」は、バックグラウンド処理とフォアグラウンド処理を併用して自動追尾と運動予測を行うものである。

特許文献4の「ロボット装置及びその制御方法」では、まずアームを対象物に追従させ、追従時のアームの運動状態と、対象物の運動状態が一致していることを利用して、対象物の移動先を予測する方法が提案されている。このように、アームの運動状態を考慮して、対象物の移動先を予測することで、移動体の把持が実現される。

先行技術文献

特許文献

[0011] 特許文献1：特開平07-019818号公報

特許文献2：特許第4072017号公報

特許文献3：特許第4153625号公報

特許文献4：特許第4265088号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0012] 上述した特許文献1によれば、対象物（被計測体またはワーク）を計測した観測履歴から、対象物の運動状態を推定することで、計測値が得られていない間のデータを補完したり、対象物をロボットで把持する際の把持地点を予測したりすることができる。

[0013] 運動状態の推定には、カルマンフィルタやパーティクルフィルタなどのベイズフィルタが一般的に用いられる。ベイズフィルタでは、特許文献2に開示されているように、運動の状態（対象物の速度、加速度など）を「内部状

態」とし、内部状態が時間と共にどのように変化するかを表す「状態遷移モデル」を事前に定義し、「観測方程式」を定義する。

[0014] ベイズフィルタは、大きく分けて、以下の2つの処理で実現される。

(1) 任意の時刻における内部状態を予測する「予測処理」。

(2) 内部状態から計測値を予測し、実際の計測値と比較して、内部状態を修正する「更新処理」（特許文献2では、「濾波推定手段」と記述されている）。

[0015] ロボットが状態推定結果を制御に用いる場合、以下の2通りの構成が考えられる。

A ロボット制御装置内に上記のアルゴリズムが実装され、ロボット制御周期ごとに(1)の予測処理を行い、センサの計測値が得られた時に、(2)の更新処理を行う。

B 特許文献1のように、状態推定装置とロボットで構成されるシステムとし、ロボットが推定装置から予測値を読み出して制御に用いる。

[0016] ロボットなどの自動機械の運動を制御する際、一定の制御周期（例：4ms周期）で制御指令値を算出することが求められる。これに対し従来技術では、運動状態の推定を使うシステムを、時間制約を考慮して構成する具体的な方法が提案されていなかった。

[0017] すなわち、ロボット制御装置は、運動状態（内部状態）を更新する処理にかかる時間の影響を受けるため、決められた制御周期で制御指令値を算出し、ロボットを制御することが困難となりえる。例えば、以下のような問題がある。

[0018] 上述したAの手段では、ロボットの制御周期内に更新処理が終わらない可能性がある。状態推定器の更新処理には、一般的に時間がかかり、特に計測値の種類が多い場合、パーティクルフィルタや、その他の複雑な処理を使う場合には特に時間がかかる。

また、特許文献2の手段は、観測値や状態変数の種類に応じて予測処理、更新処理を分けることで、目的に応じて計算量を減らすことができるが、複

雑な運動や、得られる計測値を全て反映させたい場合は、結局全ての処理を連結する必要があるため、推定に必要な計算量は減少しない。

[0019] また上述したBの方法は、ロボット制御装置が更新処理をする必要はないが、ロボットが予測値を要求してから、推定装置が一定時間内に予測処理を完了し、予測値を返さなければならない。これを満たす状態推定装置を設計するには、例えば、次のような問題を考慮する必要がある。

[0020] (1) ロボットが多数に増えた時や、更新処理の負荷が高い時は、推定装置の演算処理能力が分散される。このような状況でも、予測処理は一定時間内に完了しなければならない。

(2) ロボットの制御周期はロボットごとに異なるため、ロボット側の要求から予測値を返すまでの時間制約は、一意に決まらない。

(3) ロボット制御装置と状態推定装置間の通信に、一定の時間がかかる。この通信の所要時間は、通信方式（有線・無線など）によって異なる。

[0021] 上記のような問題によって、上述のように、決められた制御周期で制御指令値を算出し、ロボットを制御することが困難となりえる。

[0022] そこで、本発明の目的は、対象物とロボット的一方または両方の内部状態を推定し、この内部状態に基づいて、ロボットの制御に必要な予測値（制御指令値）を生成する場合に、内部状態の更新処理にかかる時間の影響を受けることなく、決められた制御周期で制御指令値を生成できる運動予測制御装置と方法を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0023] 本発明によれば、対象物とロボット的一方または両方を計測することによりセンサ情報を取得する計測装置と、

センサ情報に基づいて、対象物とロボット的一方または両方の内部状態を予測して更新する状態推定装置と、

前記内部状態を記憶するデータ記憶装置と、

前記ロボットを制御するロボット制御装置と、を備え、

状態推定装置は、ロボットの制御周期に依らない任意のタイミングで、前

記内部状態を更新し、

ロボット制御装置は、前記制御周期で、データ記憶装置に記憶された最新の内部状態に基づいて、ロボットの制御に必要な予測値を算出する、ことを特徴とする運動予測制御装置が提供される。

[0024] 本発明の第1実施形態によると、計測装置は、対象物やロボット間の相対関係を前記センサ情報として計測し、状態推定装置は、対象物やロボット（対象物とロボットの一方または両方）の内部状態を予測して更新し、

前記状態推定装置は、前記内部状態を予測する全体予測部と、データ記憶装置に記憶された内部状態を更新する更新部とを有し、

前記ロボット制御装置は、前記ロボットの制御周期でその制御に必要な予測値を予測するロボット上予測部を有しており、

(A) 前記制御周期に依らない任意のタイミングで、前記計測装置、状態推定装置、及びデータ記憶装置により、対象物やロボット間の相対関係を計測し、対象物やロボットの内部状態を予測して更新し、更新した内部状態と予測に用いた状態遷移方程式を記憶し、

(B) 前記ロボット制御装置により、データ記憶装置に記憶された最新の内部状態に基づき、前記制御周期で、前記予測値を予測し、予測値に基づいてロボットをリアルタイムに制御する。

なお、対象物やロボット間の相対関係とは、対象物と、ロボット制御装置が制御するロボットとの相対関係（例えば、相対位置、相対姿勢、相対速度、相対加速度または相対姿勢変化）、または、ロボット制御装置が制御するロボットと他のロボットとの相対関係（例えば、相対位置、相対姿勢、相対速度、相対加速度または相対姿勢変化）を意味する（以下、同様）。

[0025] 本発明の第2実施形態によると、計測装置は、ロボットの制御周期に依らない任意のタイミングで、対象物や複数のロボット（すなわち、対象物と複数のロボット、対象物、複数のロボット、または、複数のロボットのうちの一部）のセンサ情報を取得し、

状態推定装置は、前記センサ情報を取得したときに、センサ情報を取得し

た時刻と同時刻の各ロボットの内部状態を予測して、予測した内部状態を（例えば観測方程式によりセンサ情報に変換して）、計測したセンサ情報と比較して更新し、

データ記憶装置は、前記更新が行われたときに、更新した内部状態と予測に用いた状態遷移方程式を記憶し、

複数のロボット制御装置は、データ記憶装置に記憶された最新の内部状態に基づき、各ロボットに必要な予測値を予測する。

[0026] 本発明の第3実施形態によると、前記ロボットは、相対的に移動する対象物を把持するものであり、

計測装置は、対象物の位置又は姿勢を前記センサ情報として計測し、

状態推定装置は、対象物を計測した計測結果から、状態遷移モデルと観測モデルに基づいて、精度指標値を含む対象物の内部状態を更新し、かつ精度指標値から対象物の把持の可否を判定し、

把持可能の場合、ロボット制御装置は、内部状態の更新結果に基づいて対象物の移動先を予測して把持動作するようにロボットを制御する。

[0027] また、本発明によれば、（A）対象物とロボット的一方または両方を計測装置で計測することによりセンサ情報を取得し、

（B）センサ情報に基づいて、対象物とロボット的一方または両方の内部状態を状態推定装置により予測して更新し、

（C）前記内部状態をデータ記憶装置により記憶し、

（D）前記ロボットをロボット制御装置により制御し、

前記（B）において、状態推定装置により、ロボットの制御周期に依らない任意のタイミングで、前記内部状態を更新し、

前記（D）において、ロボット制御装置により、前記制御周期で、データ記憶装置に記憶された最新の内部状態に基づいて、ロボットの制御に必要な予測値を算出する、ことを特徴とする運動予測制御方法が提供される。

[0028] 本発明の第1実施形態によると、前記状態推定装置は、前記内部状態を予測する全体予測部と、データ記憶装置に記憶された内部状態を更新する更新

部とを有するものであり、

前記（Ａ）～（Ｃ）において、前記制御周期に依らない任意のタイミングで、前記計測装置、状態推定装置、及びデータ記憶装置により、対象物やロボット間の相対関係を前記センサ情報として計測し、対象物やロボットの内部状態を予測して更新し、更新した内部状態と予測に用いた状態遷移方程式を記憶し、

前記（Ｄ）において、前記ロボット制御装置により、データ記憶装置に記憶された最新の内部状態に基づき、前記制御周期で、前記予測値を予測し、ロボットをリアルタイムに制御する。

[0029] 本発明の第２実施形態によると、ロボットの制御周期に依らない任意のタイミングで、前記（Ａ）において、計測装置により対象物や複数のロボットのセンサ情報を取得し、前記（Ｂ）において、状態推定装置によりセンサ情報を取得した時刻と同時刻の各ロボットの内部状態を予測して、予測した内部状態をセンサ情報と比較して更新し、前記（Ｃ）において、データ記憶装置により、更新した内部状態と予測に用いた状態遷移方程式を記憶し、

前記（Ｄ）において、複数のロボット制御装置により、データ記憶装置に記憶された最新の内部状態に基づき、各ロボットに必要な予測値を予測する。

[0030] 本発明の第３実施形態によると、前記ロボットは、相対的に移動する対象物を把持するものであり、

前記（Ａ）において、計測装置により、対象物の位置又は姿勢を前記センサ情報として計測し、

前記（Ｂ）において、計測した計測結果から、状態推定装置により、状態遷移モデルと観測モデルに基づいて、精度指標値を含む対象物の内部状態を更新し、かつ精度指標値から対象物の把持の可否を判定し、

前記（Ｄ）において、把持可能の場合、ロボット制御装置により、内部状態の更新結果に基づいて対象物の移動先を予測してロボットに把持動作をさせ、

把持不可の場合、把持可能となるまで、前記（A）と（B）を繰り返す

発明の効果

[0031] 上述した本発明によると、ロボットの制御周期に依らない任意のタイミングで、対象物とロボットの一方または両方のセンサ情報を取得し、センサ情報に基づいて対象物とロボットの一方または両方の内部状態を予測して更新するので、ロボットの制御周期内に、内部状態を更新する必要がなくなる。

また、データ記憶装置に記憶された最新の内部状態に基づき、前記制御周期で、前記予測値を予測し、ロボットをリアルタイムに制御するので、状態推定の計算量の影響を受けることなく、決められた制御周期でロボットの制御に必要な予測値（制御指令値）を算出し、ロボットを制御することができる。

したがって、ロボット制御装置は、内部状態の更新処理にかかる時間の影響を受けることなく、決められた制御周期で制御指令値を生成できる。

図面の簡単な説明

[0032] [図1]本発明の第1実施形態による運動予測制御装置を備えたロボットシステムの第1構成例である。

[図2]本発明の第1実施形態による運動予測制御装置の第1構成例である。

[図3]本発明の第1実施形態による運動予測制御装置の第2構成例である。

[図4]本発明の第1実施形態による運動予測制御装置を備えたロボットシステムの第2構成例である。

[図5]本発明の第1実施形態による運動予測制御装置を備えたロボットシステムの第3構成例である。

[図6]本発明の第2実施形態による運動予測制御装置を備えたロボットシステムの模式図である。

[図7]本発明の第2実施形態による運動予測制御装置の第1構成例である。

[図8]本発明の第2実施形態による運動予測制御装置の第2構成例である。

[図9]本発明の第2実施形態による運動予測制御装置の第3構成例である。

[図10]本発明の第2実施形態による運動予測制御装置の第4構成例である。

[図11]本発明の第3実施形態による運動予測制御装置を有するロボットシステムの構成例である。

[図12]本発明の第3実施形態による運動予測制御装置の構成例である。

[図13]本発明の第3実施形態による運動予測制御方法の全体フロー図である。

[図14]本発明の第3実施形態の実施例における経過時間と精度指標値Eとの関係を示す図である。

発明を実施するための形態

[0033] 以下、本発明の好ましい実施形態を添付図面に基づいて詳細に説明する。なお、各図において共通する部分には同一の符号を付し、重複した説明を省略する。

[0034] [本発明の第1実施形態]

図1は、本発明の第1実施形態による運動予測制御装置を備えたロボットシステムの第1構成例である。

この図において、1はワーク、2は移動可能なロボット、3はロボットアーム、4はハンド、5aはハンド4に固定された第1カメラ、5bは外部の定位置に固定された第2カメラ、6は固定されたランドマーク、10は第1実施形態の運動予測制御装置である。以下、ワーク1とランドマーク6をまとめて「対象物」とする。

このロボットシステムは、振り子運動しながら移動するワーク1や固定されたランドマーク6をカメラ5a、5bで計測し、ロボット2をカメラ5bで計測し、ロボット2をワーク1に追従させて制御し、ハンド4によりワーク1を把持するようになっている。なお、この例においてランドマーク6の位置は分かっている必要はない。

[0035] 図2は、本発明の第1実施形態による運動予測制御装置の第1構成例である。

この図において、第1実施形態の運動予測制御装置10は、計測装置12

、状態推定装置 14、データ記憶装置 16、及びロボット制御装置 20を備える。装置 12、14、20は、データ記憶装置 16に接続されている。

[0036] 計測装置 12は、対象物やロボット 2間の相対関係を計測する。計測装置 12で計測される対象物やロボット間の相対位置や姿勢などの計測結果を、計測値 Yとする。計測値 Yは、計測装置の種類や、計測される対象に応じてそれぞれ定義される。計測値 Yは、計測される対象（ワーク 1か、ランドマーク 6か、移動ロボット 2か）や、計測装置の種類によって、中身が異なる。

例えば、相対関係とは、位置、姿勢、速度、角速度、加速度、角加速度などの情報である。

[0037] 計測装置 12は、この例では第 1カメラ 5a、第 2カメラ 5b、ロボット制御装置 20にそれぞれ接続された 3台の計測装置（第 1計測装置 12a、第 2計測装置 12b、第 3計測装置 12c）からなる。

すなわち、この例では、カメラと計測装置をそれぞれ 2台使い、第 1カメラ 5aと第 2カメラ 5bから対象物の画像を取り込み、画像処理によって、対象物の計測値 Yを求める。また、計測装置 12bは、ロボット 2の画像も取り込み、画像処理によって、ロボット 2の計測値 Yも求める。計測装置 12cは、ロボット 2のタイヤの移動量や、アーム関節の回転量をエンコーダで計測し、ロボット 2の計測値 Yを求める。求められた対象物やロボット 2の計測値 Yは、データ記憶装置 16に記憶される。

なお、計測装置 12は、この構成に限定されず、対象物やロボット 2間の相対関係を計測することができる装置、例えばレーザレーダ、加速度センサ、ジャイロセンサ、速度センサなどを用いてもよい。

[0038] 状態推定装置 14には、カルマンフィルタのアルゴリズムを基にした状態推定アルゴリズムが実装されている。このアルゴリズムでは、ワーク 1が吊るされている振り子の振れ角 θ や、 $\Delta\theta$ 、支点位置 x 、 y 、 z 、ランドマーク 6の位置 X_l 、 Y_l 、 Z_l 、姿勢 RX_l 、 RY_l 、 RZ_l 、ロボット 2の位置 X_r 、 Y_r 、 Z_r 、姿勢 RX_r 、 RY_r 、 RZ_r などの状態変数をまと

めて、内部状態 X とする。

また、時刻が進むと内部状態 X がどのように変化するかを示す状態遷移方程式 $X(t + \Delta t) = f(X(t))$ と、内部状態 X と計測値 Y を対応づける観測方程式 $Y = h(X)$ を定義する。観測方程式は、計測値 Y の種類ごとにそれぞれ定義される。

またこのアルゴリズムは、内部状態 X の誤差分布 $C_{\nu X}$ や、計測値の誤差分布 $C_{\nu Y}$ などを管理しており、これらのデータから状態推定の精度を求めることができる。なお以下の例では、これらの精度指標値をまとめて E とする。

[0039] 状態推定装置14は、対象物やロボット2の内部状態を予測する全体予測部15aと、データ記憶装置16に記憶された内部状態を更新する更新部15bとを有し、対象物やロボット2の内部状態を予測し更新する。

[0040] 全体予測部15aでは、データ記憶装置16に記録されている内部状態 X を、状態遷移方程式 $f(X)$ を使って、指定された時刻まで遷移させる計算を行う。

[0041] 更新部15bでは、データ記憶装置16にある内部状態 X と、観測方程式 $h(X)$ を使って、対象物やロボット2の計測値 Y の予測値を算出する。入力された計測値 Y と、予測値を比較して、内部状態 X を更新し、データ記憶装置16に記録する。この時、状態推定の精度指標 E も同時に更新し、データ記憶装置16に記録する。

[0042] 上述した計測装置12、状態推定装置14、及びデータ記憶装置16は、ロボット2の制御周期と異なるタイミングで実行される非リアルタイム処理系である。この非リアルタイム処理系の処理間隔は、ロボット2の制御周期よりも長くてもよく、かつ周期が一定でなくてもよい。この処理間隔は、例えば30~80msである。

従って、上述した構成により、ロボット2の制御周期と異なるタイミングで、計測装置12、状態推定装置14、及びデータ記憶装置16により、対象物やロボット間の相対関係（例えば相対位置と姿勢）を計測し、対象物や

ロボット2の内部状態を予測して更新し、更新した内部状態と予測に用いた状態遷移方程式を記憶する。

[0043] ロボット制御装置20は、この例では、受信部21、指令値算出部22、送信部23、及びロボット上予測部24を有する。

[0044] 受信部21は、ロボット2からその位置情報（エンコーダ情報など）を受信する。

指令値算出部22は、ロボット上予測部24による予測値から、ロボット2に対する指令値を算出する。予測値は、例えばワーク1やロボット2の現在位置や未来位置である。

送信部23は、算出された指令値をロボット2に送信する。

ロボット上予測部24は、所定の制御周期でロボット2の制御に必要な予測値を予測する。

[0045] すなわち、ロボット制御装置20は、ロボット2の制御に必要な予測値を得るための予測処理（prediction）を行うロボット上予測部24を有する。

なおロボット上予測部24は、ロボット2の制御に関連する内部量（予測値）を予測できれば良く、全ての内部量を予測する必要はない。

[0046] ロボット制御装置20は、ロボット2に一定周期（例：4ms）で動作指令を送信し、ロボット2のエンコーダ情報などを受信する。受信した位置情報は、前述の計測装置12cによって取得され、移動ロボット2の計測値Yとなる。

ロボット上予測部24を使って、対象物やロボット2の現在及び未来の運動状態を予測し、指令値の算出に用いる。

ロボット上予測部24は、データ記憶装置16に記録されている内部状態Xのうち、ロボット制御に関連する状態量を、状態遷移方程式 $f(X)$ を使って、指定された時刻まで遷移させる計算を行う。

[0047] データ記憶装置16は、上述した内部状態X、内部状態のモデル時刻 t_x 、計測値Y、計測された時刻 t_y 、状態遷移方程式 f 、観測方程式 h 、状態

推定の精度指標値Eなどのデータを保持する。

[0048] 上述したロボット制御装置20は、ロボット2の制御周期で制御されるリアルタイム処理系である。この制御周期は、上述した非リアルタイム処理系の処理間隔よりも短い一定周期である。この制御周期は、例えば3~4msである。

従って、上述した構成により、ロボット制御装置20により、データ記憶装置16に記憶された最新の内部状態に基づき、ロボット2の制御周期で、その制御に必要な予測値を予測し、ロボット2をリアルタイムに制御する。

[0049] 以下、本発明の第1実施形態による運動予測制御装置10の動作を説明する。

計測装置12は、任意のタイミングで対象物やロボット2を計測し、データ記憶装置16に計測結果をセンサ情報として記録する。

状態推定装置14は、データ記憶装置16に新しい計測結果が記録されると、予測処理、更新処理(Correction)によって、内部状態を推定する。算出した内部状態や、推定に使った状態遷移方程式などはデータ記憶装置16に記録する。

[0050] ロボット制御装置20は、一定の制御周期でロボット2を制御する。この時、ロボット上予測部24を使って、任意の時刻における対象物やロボット2の予測位置を算出し、制御に用いる。ロボット上予測部24は、データ記憶装置16に記録されている最新の内部状態や、状態遷移モデルを使って、予測処理を行う。

ロボット制御装置20は、一定の制御周期で処理を行うリアルタイム処理系として動作する。それ以外の各装置は、一定周期の時間制約を持たない、非リアルタイム処理系でよい。

[0051] 以下、上述した第1実施形態の運動予測制御装置10の作用を説明する。

2台の計測装置(第1計測装置12aと第2計測装置12b)は以下の(1)~(3)を任意のタイミングで繰り返す。

(1) 任意のタイミングでカメラ5a, 5bにシャッター信号を送信し、

撮像された画像を取得する。

(2) 得られた画像から画像処理によって対象物やロボット2の位置・姿勢情報(計測値 Y)を取得する。例えば、画像内の白色領域を抽出し、重心を求める。

(3) 算出した計測値 Y と、シャッター時刻(計測値された時刻 t_y)、計測値 Y の誤差分布 $C_{\sigma Y}$ をデータ記憶装置16に記録する。

[0052] また、計測装置12cは、以下の(a1)~(a3)を任意のタイミングで繰り返す。

(a1) 任意のタイミングでロボット制御装置20のエンコーダ情報を取得する。

(a2) 得られたエンコーダ情報から、タイヤの移動量や関節角度を求め、移動ロボット2の位置・姿勢情報(計測値 Y)を取得する。

(a3) 算出した計測値 Y と、エンコーダの計測時刻、計測値 Y の誤差分布 $C_{\sigma Y}$ をデータ記憶装置16に記録する。

[0053] 状態推定装置14は以下の(4)~(6)を計測値 Y が更新されるたびに実施する。

(4) データ記憶装置16を監視し、新たな計測値 Y が記録されていたら、データ記憶装置16から Y , t_y , X , t_x , f , h , E を読み出す。

(5) 内部状態 X は、時刻 t_x の時の内部状態を示しているので、全体予測部15aを使って、時刻 t_y のときの内部状態を予測する。

(6) 更新部15bを使って、時刻 t_y の時の計測値を予測し、予測値と計測値 Y を比較して、内部状態 X を修正する。修正した内部状態 X と新たなモデル時刻 $t_x (= t_y)$ をデータ記憶装置16に記録する。また更新部15bは、内部状態 X の誤差分布 $C_{\sigma X}$ や、計測値と予測値の差などの精度指標 E を算出し、データ記憶装置16に記録する。

[0054] ロボット制御装置20は以下の(7)~(10)を任意の周期で繰り返す。

(7) ロボット2からエンコーダ情報などを受信する。ロボット2との通

信は、例えば4ms周期で行われるようにロボット2が管理する。したがって、ロボット制御部20は、データを受信するまで待機し、データを受信してから4ms以内に(11)の送信処理を完了しなければならない。

(8) ロボット上予測部24を使ってワークやロボットの現在位置や、未来の位置を算出する。この計算を行う際、ロボット上予測部24は、データ記憶装置16にある最新の内部状態等を参照する。

(9) 予測したワーク1の位置にアーム手先が近づくように、目標軌道を算出する。また、状態推定の精度指標値Eを評価して、状態推定が精度良く行われている場合は、未来のワークの位置へ把持動作するように、アームの目標軌道、ハンド開閉指令値を算出する。

(10) 算出された目標軌道やハンド開閉指令値をロボット2に送信する。

[0055] 図3は、本発明の第1実施形態による運動予測制御装置の第2構成例である。

この例は、ロボット制御装置20とデータ記憶装置16の間の通信所要時間が長い場合に適している。

すなわちこの例において、データ記憶装置16は、ロボット2からの要求に依らないタイミングで、データ記憶装置16に記憶された最新の内部状態をロボット上記憶部26に転送する機能を有する。

[0056] この構成により、データ記憶装置16は、データ記憶装置16に記録されている内部状態や状態遷移モデルを、ロボット上記憶部26に転送する。ロボット上予測部24は、ロボット上記憶部26にあるデータを参照して処理を行う。

転送するタイミングは、データ記憶装置16の内部状態Xが更新された時((6)の直後)であるのがよい。

なおデータ転送を、データ記憶装置16に新たなデータが記録されたことを検出した時((6)の直後)とするか、または、一定の時間ごとに行う。あるいは前述の両方のタイミングで行ってもよい。

[0057] この構成により、データ記憶装置 16 の内容を、ロボット上記憶部 26 に逐次転送し、ロボット上予測部 24 は、ロボット上記憶部 26 を参照するので、上述した (8) の計算では通信する必要が無い。したがって、無線通信などの通信所用時間が長い通信を用いた場合でも、通信時間の影響を回避することができる。

[0058] 図 4 は、第 1 実施形態による運動予測制御装置を備えたロボットシステムの第 2 構成例である。

この例は、ロボット 2 が固定されており、ランドマーク 6 がない点でロボットシステムの第 1 構成例と相違する。その他の構成は第 1 構成例と同様である。

すなわちこの例は、固定されたロボット 2 のアーム 3 で移動するワーク 1 を把持するケースであり、ロボット 2 に関する推定をしなくても良い点でロボットシステムの第 1 構成例と相違する。

[0059] 図 5 は、第 1 実施形態による運動予測制御装置を備えたロボットシステムの第 3 構成例である。

この例は、ロボット 2 が位置の分かっているランドマーク 6 から自己位置推定するケースであり、ワークに関する推定や、ランドマーク 6 の位置と姿勢の推定をしなくても良い点で第 1 構成例と相違する。

[0060] この例は、移動ロボット 2 が位置の分かっているランドマーク 6 を計測して、ロボット 2 の自己位置を推定する場合である。この例では、推定する内部量 X は、ロボット 2 の原点位置 (X_r, Y_r, Z_r)、ロボット 2 の姿勢 ($R_{x_r}, R_{y_r}, R_{z_r}$) である。その他に、車輪のステア角、速度、角速度などを推定してもよい。

[0061] 更新処理で用いる計測値には、カメラ 5 a がランドマーク 6 を計測した結果、カメラ 5 b がロボット 2 の位置を計測した結果、ロボット制御装置 20 が記録する車輪の回転量 (θ) などを用いる。

ロボットシステムの第 3 構成例において、他の点は、ロボットシステムの第 1 構成例と同じであってよい。

[0062] なお、本発明の第1実施形態は上述した構成例に限定されない。

例えば、複数のロボットとワークが存在する場合も、ワークの運動状態推定と、ロボットの運動状態推定の組み合わせとなるため、上述した第1実施形態により、ロボット制御の時間制約を考慮したシステムを実現できる。

上述した実施例では、振り子運動するワーク、車輪型の移動ロボットを示したが、それぞれが移動する形態はこれらに限定されない。例えば、ワークは、コンベア上を移動するもの、水上で浮遊するもの、飛んでいるものでもよい。ロボットは、クローラ式や、レール上を移動する方式などでもよい。また、固定されたアームでも、土台が揺れたり、受動的に動いたりするケースも「移動」に含む。

[0063] また、各装置は、別々の処理装置に分ける必要はない。例えば、計測プログラム、状態推定プログラムとして、一つのPC上で複数プログラムを並列処理させる構成であってもよい。

ただし、ロボット制御装置（プログラム）は、一定周期の制約下で処理を行うリアルタイム処理系とする。なおリアルタイムOSでは、非リアルタイム処理のプログラムとリアルタイム処理のプログラムを並列させることもできる。

データ記憶装置16は、複数の装置、プログラムが同一のデータを読み書きする共有メモリであれば良い。したがって、独立した装置とする必要はなく、状態推定装置14や計測装置12などのメモリ空間上に用意されていれば良い。

[0064] 上述した第1実施形態の装置と方法によれば、計測装置12、状態推定装置14、及びデータ記憶装置16により、対象物やロボット間の相対関係（例えば相対位置）を計測し、対象物やロボット間の内部状態を予測して更新し、更新した内部状態と予測に用いた状態遷移方程式を記憶するので、対象物（ワークやランドマーク）やロボットの相対関係の計測結果（例えば位置、姿勢）に基づいて移動体（ワークや移動ロボット）の運動予測をすることができる。

[0065] また、ロボット制御装置 20 が、ロボット 2 の制御周期でロボット 2 の制御に必要な予測値を予測するロボット上予測部 24 を有しており、データ記憶装置 16 に記憶された最新の内部状態に基づき、前記制御周期で、前記予測値を予測し、ロボット 2 をリアルタイムに制御するので、状態推定の計算量の影響を受けることなく、ロボットごとに決められた制御周期で制御指令値を算出し、ロボット 2 を制御することができる。

[0066] すなわち、ロボット制御装置 20 は、状態推定の更新処理にかかる時間の影響を受けることなく動作できる。

また、計測装置 12 やロボット制御装置 20 が増え、状態推定の計算量が増加する場合も、各ロボット制御装置 20 が独立して予測計算を行うため、予測処理にかかる時間は長くない。したがって、システム変更の際に、演算処理能力などの設計を見直す必要がなくなる。

さらに、予測処理の時間制約をロボット制御装置 20 ごとに設定できる。また、算出する予測値の精度や、予測値の種類なども、ロボット制御装置 20 ごとに設定できる。したがって、予測処理にかかる時間や制御周期等を考慮して、予測計算の精度を変えたり、内部状態のうち必要な変数のみを計算したりといった工夫を、それぞれのロボット 2 で実現できる。

[0067] また、データ記憶装置 16 が、ロボット 2 からの要求に依らないタイミングで、データ記憶装置 16 に記憶された最新の内部状態をロボット上記憶部 26 に転送することで、ロボット制御装置 20 と状態推定装置 14 間の通信に時間がかかる場合や、通信所要時間が一定でない場合でも、予測処理に必要なデータをすぐに参照できる。この場合、ロボット 2 上で参照されるデータは、通信遅れの影響で、必ずしも最新値とならないが、予測処理が一定時間内に完了することができる。

[0068] なお、第 1 実施形態は上述した構成例に限定されず、特許請求の範囲の記載によって示され、さらに特許請求の範囲の記載と均等の意味および範囲内でのすべての変更を含むものである。

[0069] [本発明の第 2 実施形態]

図6は、本発明の第2実施形態による運動予測制御装置を備えたロボットシステムの模式図である。

この図において、101は移動ロボット、102は移動ロボット101の外部に固定されたランドマーク、103は移動ロボット101に固定された内部センサ、104は移動ロボット101の外部に固定された外部センサである。

このシステムにおいて、複数の移動ロボット101は、それぞれ自律的に移動できるようになっている。

以下、第2実施形態において、移動ロボットを単に「ロボット」と呼ぶ。

[0070] 図7は、本発明の第2実施形態による運動予測制御装置の第1構成例である。

この図において、第2実施形態の運動予測制御装置110は、計測装置112、状態推定装置114、データ記憶装置116、及び複数のロボット制御装置120を備える。装置112、114、120は、データ記憶装置116にそれぞれ直接接続されている。

複数のロボット制御装置120は、この例では第1ロボット制御装置120A、第2ロボット制御装置120B、および第3ロボット制御装置120Cからなる。

なお、ロボット制御装置120は、この例では3台であるが、2台でも、4台以上であってもよい。

[0071] 計測装置112は、対応する外部センサ104に接続され、外部センサ104のセンサ情報（観測値）を取り込む。外部センサ104としては、カメラ、レーザーレンジファインダ（LRF）、3次元レーザレーダ、ジャイロセンサ、GPSコンパス、パルスエンコーダ、などが挙げられる。

計測装置112は、任意のタイミングで、外部センサ104からセンサ情報を読み込み、後述する計測処理（作用の（1）～（3））を行う。

ロボット制御装置120上の計測部124は、計測装置112と同様の機能を有する。また、後述するロボット制御装置120の構成のうち、移動機

構や駆動制御のための処理部が無いものを、この例では「計測装置 1 1 2」とする。

[0072] 状態推定装置 1 1 4 には、カルマンフィルタのアルゴリズムを基にした状態推定アルゴリズムが実装されている。このアルゴリズムでは、ロボット 1 0 1 の位置 x , y , z 、速度 v_x , v_y , v_z 、角速度 $d r_x$, $d r_y$, $d r_z$ などの状態変数をまとめて、内部状態 X とする。

また、時刻が進むと内部状態 X がどのように変化するかを示す状態遷移方程式 $X(t + \Delta t) = f(X(t))$ と、内部状態 X と観測値 Y を対応づける観測方程式 $Y = h(X)$ を定義する。観測方程式は、観測値 Y (センサ情報) の種類ごとにそれぞれ定義される。

またこのアルゴリズムは、内部状態 X の誤差分布 $C_{\cdot X}$ や、観測値 Y の誤差分布 $C_{\cdot Y}$ などを管理しており、これらのデータから状態推定の精度を求めることができる。なお以下の例では、これらの精度指標値をまとめて E とする。

[0073] 状態推定装置 1 1 4 には、全体予測部 1 1 5 a と更新部 1 1 5 b の 2 つの機能が実装される。

[0074] 全体予測部 1 1 5 a は、データ記憶装置 1 1 6 に記録されている内部状態 X を、状態遷移方程式 $f(X)$ を使って、指定された時刻まで遷移させる計算を行う。

更新部 1 1 5 b は、全体予測部 1 1 5 a を使って計測時刻まで遷移させた内部状態 X と、観測方程式 $h(X)$ を使って、対象物 (ロボット 1 0 1 又はランドマーク 1 0 2) の観測値 Y の予測値を算出する。入力された観測値 Y と、予測値を比較して、内部状態 X を更新し、データ記憶装置 1 1 6 に記録する。この時、状態推定の精度指標値 E も同時に更新し、データ記憶装置 1 1 6 に記録する。

[0075] 図 7 のロボット制御装置 1 2 0 は、一般的なロボット 1 0 1 で用いられる構成を示している。

この図において、ロボット制御装置 1 2 0 は、移動のための駆動部 1 2 1

、駆動部 121 を制御する車両制御部 122、ロボット 101 の目標軌道を算出する行動計画部 123、各センサ 103 のセンサ処理を行う計測部 124 で構成される。

センサ 103 として用いられるのは、主に、ロボット 101 の角速度又は加速度を計測するジャイロセンサ 103 a、周囲の形状を計測する測距センサ 103 b (LRF)、ロボット 101 に設けられた車輪の回転量を計測する車輪用エンコーダ 103 c である。

[0076] 図 8 は、本発明の第 2 実施形態による運動予測制御装置の第 2 構成例である。なおこの図では、ロボット制御装置 120 のみを示している。

第 2 実施形態では、センサ 103 の種類は限定されない。すなわち例えば図 8 に示すように、カメラ 103 d、GPS コンパス 103 e、ロボット 101 に設けられた車輪のステア角計測用のステア角エンコーダ 103 f などのセンサを追加しても良いし、一部のセンサを使わない構成としても良い。運動予測制御装置の第 2 構成例において、他の点は、運動予測制御装置の第 1 構成例と同じであってよい。

[0077] 図 7、図 8 において、行動計画部 123 は、一定の制御周期で動作するリアルタイム処理系であり、ロボット上予測部 123 a を使って、自ロボット 101 の現在又は未来の位置や姿勢を予測し、軌道生成部 123 b によるロボット 101 の目標軌道の算出に用いる。また、衝突回避の場合など、必要に応じて、他ロボット 101 の現在又は未来の位置や姿勢を予測する。

[0078] ロボット上予測部 123 a は、データ記憶装置 116 に記録されている内部状態 X のうち、ロボット制御に関連する状態量を、状態遷移方程式 $f(X)$ を使って、指定された時刻まで遷移させる計算を行う。ロボット上予測部 123 a は、リアルタイム制御の時間制約下で予測処理できるように設計される。

[0079] 車両制御部 122 は、一定の制御周期で動作するリアルタイム処理系であり、ロボット 101 が目標軌道に沿って動くように、指令値算出部 122 a で指令値を算出し駆動部 121 を制御する。

[0080] 通信部 125 は、ロボット 101（すなわち、ロボット 101 に設けられたロボット制御装置 120）とデータ記憶装置 116 間のデータ通信機能を有する。具体的には、イーサネット（登録商標）や USB などの有線通信や、Bluetooth（登録商標）、無線 LAN、などの無線通信を行うデバイスを用いる。

[0081] データ記憶装置 116 は、内部状態 X 、内部状態のモデル時刻 t_x 、観測値 Y 、計測された時刻 t_y 、状態遷移方程式 f 、観測方程式 h 、状態推定の精度指標値 E などのデータを保持する。

[0082] 以下、上述した本発明の第 2 実施形態の運動予測制御装置 110 の作用を説明する。

計測装置 112 または計測部 124 は、以下の（1）～（3）を任意のタイミングで繰り返す。

（1）任意のタイミングでセンサ情報を取得する。例えばカメラの場合は、カメラにシャッター信号を送信し、撮像された画像を取得する。

（2）取得したセンサ情報を処理し、ロボット 101 やランドマーク 102 の位置と姿勢や、ロボット 101 の速度又は角速度などの、観測値 Y を求める。観測値 Y は、センサごとに異なるため、センサごとに定義される。また、ここで行うセンサ情報の処理も、センサの種類によって異なる。例えばカメラの場合は、得られた画像から画像処理によって対象物（ロボット 101 又はランドマーク 102）の位置と姿勢のセンサ情報を取得する（例：画像内の白色領域を抽出し、重心を求める）。また例えば、パルスエンコーダの場合はパルス波のカウント処理などが考えられる。

（3）算出した観測値 Y と、計測された時刻 t_y （シャッター時刻など）、観測値 Y の誤差分布 $C_{\sigma, Y}$ をデータ記憶装置 116 に記録する。

[0083] また、状態推定装置 114 は以下の（4）～（6）を観測値 Y が更新されるたびに実施する。

（4）データ記憶装置 116 を監視し、新たな観測値 Y が記録されていたら、データ記憶装置 116 から Y , t_y , X , t_x , f , h , E を読み出す

。

(5) 内部状態 X は、時刻 t_x の時の内部状態を示しているので、全体予測部115aを使って、時刻 t_y のときの内部状態を予測する。

(6) 更新部115bを使って、(5)で予測した内部状態から時刻 t_y の時の観測値を予測し、予測値と観測値 Y を比較して、内部状態 X を修正(更新)する。修正した内部状態 X と新たなモデル時刻 $t_x (= t_y)$ をデータ記憶装置116に記録する。また更新部115bは、内部状態 X の誤差分布 $C_{\nu} X$ や、観測値と予測値のずれの大きさなどの精度指標値 E を算出し、データ記憶装置116に記録する。

[0084] また、ロボット制御装置120上の行動計画部123は、以下の(7)~(8)を一定の周期で繰り返す。

(7) ロボット上予測部123aを使って自ロボット101の現在位置や未来の位置を算出する。また、衝突回避などの必要に応じて、他ロボット101の現在位置や未来の位置を算出する。

(8) 自ロボット101が目標位置に移動するような目標軌道を生成する

。

[0085] また、ロボット制御装置120上の車両制御部122は、以下の(9)~(11)を一定の周期で繰り返す。

(9) 車輪用エンコーダ103cから自ロボット101の現在速度を求める。

(10) 行動計画部123で生成された目標軌道に沿って動くような、制御指令値を算出する。

(11) 駆動部121に算出した制御指令値を送信する。

[0086] 駆動部121を精密に制御するには、車両制御部122が一定周期で制御指令値を算出する必要がある。また、車両制御部122で参照する目標軌道は、行動計画部123で事前に生成されている必要がある。したがって、行動計画部123、車両制御部122の処理は、一定の周期で繰り返されるリアルタイム処理である。

[0087] 一般に、行動計画部 1 2 3 の制御周期は、車両制御部 1 2 2 の制御周期よりも長い（一度に生成する目標軌道の長さなどによる）。また、目標軌道には、車両制御部 1 2 2 が参照する直近の移動経路の他に、目標地点までの大まかな移動経路などがある。したがって、局所の経路生成、大域の経路生成、より大域の経路生成のように、行動計画部 1 2 3 をさらに 2 つ以上の処理に分けることもある。この場合は、局所の経路を生成する処理の方が、短い制御周期となる。大域の方は、長い制御周期か、周期が一定でない非リアルタイムな処理でも構わない。

[0088] 図 9 は、本発明の第 2 実施形態による運動予測制御装置の第 3 構成例である。この例において、ロボット制御装置 1 2 0 は、さらにロボット上記憶部 1 2 6 を備える。

上述した（7）の計算を行う際、ロボット上予測部 1 2 3 a は、データ記憶装置 1 1 6 にある最新の内部状態 X を参照する。この時、通信のための時間がかかることで、一定の時間制約下で予測値を求められない場合がある。そこで、この例では、データ記憶装置 1 1 6 の内容を、ロボット上記憶部 1 2 6 に逐次転送し、ロボット上予測部 1 2 3 a は、ロボット上記憶部 1 2 6 を参照する。転送するタイミングは、データ記憶装置 1 1 6 の内部状態 X が更新された時とする（上述した（6）の直後）。

[0089] 第 2 ロボット制御装置 1 2 0 B、第 3 ロボット制御装置 1 2 0 C も、第 1 ロボット制御装置 1 2 0 A と同様に、ロボット上予測部 1 2 3 a とロボット上記憶部 1 2 6 などを有する。

なお、ロボット制御装置 1 2 0 は、この例では 3 台であるが、2 台でも、4 台以上であってもよい。

運動予測制御装置の第 3 構成例において、他の点は、運動予測制御装置の第 1 構成例または第 2 構成例と同じであってよい。

[0090] 図 1 0 は、本発明の第 2 実施形態による運動予測制御装置の第 4 構成例である。なおこの図では、ロボット制御装置 1 2 0 のみを示している。

上述した例では、説明上「計測装置 1 1 2」という表現を用いたが、計測

装置 112 は移動機構を持たないロボット制御装置 120（すなわちロボット 101）に設けられたものであり、ロボット制御装置 120 の一種として扱う。

したがって、本発明の第 2 実施形態におけるシステム構成は状態推定装置 114 とロボット制御装置 120 の 2 種類とし、ロボット制御装置 120（ロボット 101）は、移動機構を持たないものを含むとする。

データ記憶装置 116 は、複数の装置、プログラムが同一のデータを読み書きする共有メモリであれば良い。したがって、独立した装置とする必要はなく、図 10 に示すように通信部 125 や状態推定装置 114 などのメモリ空間上に用意されていれば良い。

また状態推定装置 114 は、いずれかのロボット 101 上に設置され、図 10 に示すようにロボット制御装置 120 と一体とする構成であってもよい。例えば、状態推定プログラム、ロボット制御プログラムとして、一つの PC 上で複数プログラムを並列処理させることができる。

運動予測制御装置の第 4 構成例において、他の点は、運動予測制御装置の第 1 構成例、第 2 構成例または第 3 構成例と同じであってよい。

[0091] 上述した例では、ロボット上予測部 123 a で算出した予測値をロボット 101 の制御に用いたが、周囲の人や物体をロボット 101 が計測して、その位置や運動の情報をロボット上予測部 123 a で予測して人に提示するなど、リアルタイムに変化する情報を提示するサービスに用いることもできる。

[0092] 上述した本発明の第 2 実施形態の方法と装置によれば、計測装置 112、状態推定装置 114、及びデータ記憶装置 116 により、ロボット 101 の制御周期に依らない任意のタイミングで、対象物や複数のロボット 101 のセンサ情報を取得し、センサ情報を取得した時刻と同時刻の各ロボット 101 の内部状態 X を予測して、予測した内部状態をセンサ情報と比較して更新し、更新した内部状態 X と予測に用いた状態遷移方程式 $f(X)$ を記憶するので、対象物（例えばランドマーク 102）やロボット 101 のセンサ情報

(例えば位置、姿勢)に基づいて各ロボット101の運動予測をすることができる。

[0093] また、複数のロボット制御装置120が、データ記憶装置116に記憶された最新の内部状態Xに基づき、各ロボット101に必要な予測値を予測するので、状態推定の計算量の影響を受けることなく、ロボット101ごとに決められた制御周期で制御指令値を算出し、複数のロボット101を制御することができる。

[0094] すなわち、各ロボット制御装置120は、状態推定の更新処理にかかる時間の影響を受けることなく動作できる。

また、計測装置112やロボット制御装置120が増え、状態推定の計算量が増加する場合も、各ロボット制御装置120が独立して予測計算を行うため、予測処理にかかる時間は長くない。したがって、システム変更の際に、演算処理能力などの設計を見直す必要がなくなる。

さらに、予測処理の時間制約をロボット制御装置120ごとに設定できる。また、算出する予測値の精度や、予測値の種類なども、ロボット制御装置120ごとに設定できる。したがって、予測処理にかかる時間や制御周期等を考慮して、予測計算の精度を変えたり、内部状態Xのうち必要な変数のみを計算したりといった工夫を、それぞれのロボット101で実現できる。

[0095] また、データ記憶装置116が、ロボット101からの要求に依らないタイミングで、データ記憶装置116に記憶された最新の内部状態Xをロボット上記憶部126に転送することで、ロボット制御装置120と状態推定装置114間の通信に時間がかかる場合や、通信所要時間が一定でない場合でも、予測処理に必要なデータをすぐに参照できる。この場合、ロボット上で参照されるデータは、通信遅れの影響で、必ずしも最新値とならないが、予測処理が一定時間内に完了することができる。

[0096] なお、本発明の第2実施形態は上述した構成例に限定されず、特許請求の範囲の記載によって示され、さらに特許請求の範囲の記載と均等の意味および範囲内でのすべての変更を含むものである。

[0097] [本発明の第3実施形態]

図11は、本発明の第3実施形態による運動予測制御装置を有するロボットシステムの構成例である。

この図において、201は対象物（ワーク）、202はロボット、203はロボットアーム、204はハンド、205aはハンド204に固定された第1カメラ、205bは外部の定位置に固定された第2カメラ、210は運動予測制御装置である。

このロボットシステムは、振り子運動しながら移動するワーク201をカメラ205a、205bで計測し、ロボット202をワーク201に追従させて制御し、ハンド204によりワーク201を把持するようになっている。

[0098] 図12は、本発明の第3実施形態による運動予測制御装置の構成例である。

この図において、運動予測制御装置210は、計測装置212、状態推定装置214、及びロボット制御装置220を備える。状態推定装置214は、データ記憶装置216を備える。

[0099] 計測装置212は、対象物201の位置と姿勢を計測する。

計測装置212は、この例では第1カメラ205aと第2カメラ205bにそれぞれ接続された2台の計測装置（第1計測装置212aと第2計測装置212b）からなる。

すなわち、この例では、カメラと計測装置をそれぞれ2台用い、第1カメラ205aと第2カメラ205bから対象物201の画像を取り込み、画像処理によって、対象物201の位置と姿勢を求める。求められた対象物201の位置と姿勢は、データ記憶装置216に記憶される。

なお、計測装置212は、この構成に限定されず、対象物201の位置を1台で3次元計測することができる計測装置、例えばレーザレーダを用いてもよい。

[0100] 状態推定装置214は、対象物201を計測した計測結果から、状態遷移

モデルと観測モデルに基づいて、精度指標値 E（後述する）を含む対象物 201 の内部状態を推定（更新）し、かつ精度指標値 E から対象物 201 の把持の可否を判定する機能を有する。

[0101] 状態推定装置 214 には、この例ではカルマンフィルタのアルゴリズムを基にした状態推定アルゴリズムが実装されている。

この状態推定アルゴリズムでは、「状態遷移モデル」として、以下の 4 つを定義する。

時刻 $t = 0$ の時の内部状態： X_0

初期条件 X_0 の共分散： $C_{0,v} X_0$

状態遷移方程式： $X_{t+\Delta t} = f(X_t, \Delta t) \dots (1)$

単位時間当たりのプロセスノイズ（共分散）： Q

[0102] このアルゴリズムでは、対象物 201 が吊るされている振り子の振れ角 θ や、角速度 $\Delta \theta$ 、支点位置 x , y , z などの状態変数をまとめて、内部状態 X とする。モデルを定義する際、初期条件が必ずしも正確にわかるわけではない。したがって、初期条件と実物の差がどの程度大きくなるかを予想した共分散 $C_{0,v} X_0$ を定義する。

状態遷移方程式 (1) は、時刻が進むと内部状態 X がどのように変化するかを示す。この例の場合、振り子の運動方程式や、支点位置が等速直線運動することなどから、状態遷移方程式を定義する。

[0103] 定義した状態遷移方程式 (1) は、必ずしも実際の対象物 201 の運動と一致しない。そこで、単位時間 ($\Delta t = 1$) の時間幅だけ状態遷移計算をした時に、実際の運動とどの程度差が生まれるかを示す共分散 Q を定義する。

また、カルマンフィルタは、計測装置 212 で算出される対象物 201 の位置と姿勢を計測値 Y とし、式 (2) (3) の「観測モデル」（観測方程式と観測ノイズ）を定義する。

観測方程式： $Y_t = g(X_t) \dots (2)$

観測ノイズ（共分散）： $C_{0,v} S_t \dots (3)$

[0104] 観測方程式 (2) は、内部状態 X と計測値 Y を対応づける式である。また

、観測ノイズ（3）は、時刻 t の時の計測にどの程度の計測誤差が含まれるかを表す共分散であり、カメラの分解能や視点の向きによって決まる。観測ノイズ（3）は固定値ではなく、画像ごとに計測装置 212 が算出し、計測値と共に状態推定装置 214 に渡される。

[0105] ロボット制御装置 220 は、把持可能の場合、内部状態の推定結果（更新結果）に基づいて対象物 201 の移動先を予測して把持動作するようにロボット 202 を制御する機能を有する。

[0106] ロボット制御装置 220 は、ロボット 202 から手先位置情報などを受信し、手先速度指令値やハンド開閉指令値を送信する。これらの送受信を、一定の制御周期（4ms 周期）で行う。

[0107] 以下、図 12 に基づき本発明の第 3 実施形態による運動予測制御方法を説明する。

第 3 実施形態の方法では、（A）初めに、計測装置 212 により、対象物 201 の位置と姿勢をセンサ情報として計測する。

（B）次いで、計測した計測結果から、状態推定装置 214 により、状態遷移モデルに基づいて、精度指標値 E を含む対象物 201 の内部状態を推定（更新）し、かつ（C）精度指標値 E から対象物 201 の把持の可否を判定する。

（D）次に、把持可能の場合、ロボット制御装置 220 により、内部状態の推定結果に基づいて対象物 201 の移動先を予測してロボット 202 に把持動作をさせ、（E）把持不可の場合、ロボット制御装置 220 により、対象物 201 の位置と姿勢の計測を継続できるようにロボット 202 を移動させる。

[0108] 精度指標値 E は、対象物 201 の位置と姿勢を予測した予測値とその実測値との誤差と、状態遷移モデルと観測モデルに基づいて前記誤差の分散を予想した共分散行列とからなる。

[0109] 前記（C）において、前記誤差を前記共分散行列で割ったマハラノビス距離 M_t の自乗が第 1 閾値より小さく、かつ、共分散行列の行列式が第 2 閾値よ

り小さい時に、把持可能と判定する、ことが好ましい。

第1閾値と第2閾値は、予め設定した任意の閾値である。

[0110] また前記(C)において、前記誤差を前記共分散行列で割ったマハラノビス距離 M_t の自乗が第3閾値より小さく、かつ、共分散行列のトレースが第4閾値より小さい時に、把持可能と判定してもよい。

第3閾値と第4閾値は、予め設定した任意の閾値である。

[0111] 以下、第3実施形態の運動予測制御装置の動作を説明する。

(a1) 計測装置212(第1計測装置212aと第2計測装置212b)は任意のタイミングで2台のカメラ(第1カメラ205aと第2カメラ205b)にそれぞれシャッター信号を送信し、撮像された画像を取得する。

(a2) 計測装置212により、得られた画像から画像処理によって対象物201の位置と姿勢の情報(計測値Y)を取得する。例えば、画像内の白色領域を抽出し、重心を求める。

(a3) 計測装置212からシャッター信号を送信した時刻を t_y とする。また、カメラ205a, 205bの向きや分解能などから、観測ノイズ C_v 、 S を算出する。

(a4) 状態推定装置214は、計測値Yと、状態遷移モデルと観測モデルによって予測したYの予測値 Y_m を比較して、内部状態Xを修正する。また、対象物201の位置を予測する精度を表す精度指標値Eを算出する。内部状態の更新は、ロボット制御装置220の制御周期に依らない任意のタイミングで行われる。

(a5) ロボット制御装置220は、制御周期ごとに状態推定装置214の結果を参照し、精度指標値Eを評価して、把持動作を開始するかどうかの判定を行う。

(a6) 把持動作を開始する場合は、対象物201の未来の位置を予測し、予測した把持位置を目指して手先速度指令値を算出する。把持動作しない場合は、カメラ205a, 205bが対象物201を捕捉し続けられるように、手先速度指令値を算出する。

[0112] 上記（a 4）における状態推定装置 2 1 4 の処理内容の詳細を以下に説明する。以下の処理内容は、カルマンフィルタを利用した一般的な状態推定手段である。

（b 1）計測時刻 t_y と現在のモデル時刻 t から、状態遷移させる時間幅 Δt を算出する。モデル時刻 t の初期値は、計測を開始した時刻とする。また、計測時刻を、開始時刻を基点とした経過時間として定義し、モデル時刻の初期値を 0 としても良い。

状態遷移させる時間幅 Δt は、 $\Delta t = t_y - t \dots (4)$ で表される。

[0113] （b 2）計測時刻 t_y における内部状態を予測する。

内部状態の予測値 $X_{t+\Delta t}$ は、上述した状態遷移モデルで定義した、 $X_{t+\Delta t} = f(X_t, \Delta t) \dots (1)$ で表される。

[0114] （b 3）計測時刻における、内部状態予測値の共分散を算出する。ここで、行列 A は状態遷移方程式 f を偏微分した行列である。

更新（b 9）前の内部状態の共分散 $C_{ov} X_{t+\Delta t} | t$ は、式（5）で表される。

$$C_{ov} X_{t+\Delta t} | t = A_t(\Delta t) \cdot C_{ov} X_t \cdot A_t(\Delta t)^T + Q \cdot |\Delta t| \dots (5)$$

状態遷移方程式の偏微分行列 $A_t(\Delta t)$ は、式（6）で表される。

$$A_t(\Delta t) = (\partial f(X_t, \Delta t) / \partial X_t) \dots (6)$$

[0115] （b 4）内部状態予測値と観測方程式を用いて、式（7）で計測値 Y の予測値 $Y_{m_{t+\Delta t}}$ を予測する。

$$Y_{m_{t+\Delta t}} = g(X_{t+\Delta t}) \dots (7)$$

[0116] （b 5）内部状態予測値の共分散に基づいて、予測値 Y_m の共分散 $C_{ov} Y_{t+\Delta t}$ を式（8）で求める。ここで、行列 H は観測方程式 g を偏微分した行列である。

$$C_{ov} Y_{t+\Delta t} = H_t \cdot C_{ov} X_{t+\Delta t} | t \cdot H_t^T \dots (8)$$

観測方程式の偏微分行列 H_t は、式（9）で表される。

$$H_t = (\partial g(X_t) / \partial X_t) \dots (9)$$

[0117] (b 6) 予測値 Y_m の共分散 $C_{ov} Y$ に加えて、カメラの計測誤差を考慮した共分散 $V_{t+\Delta t}$ を、式 (10) で求める。 $C_{ov} S_{t+\Delta t}$ は時刻 $t_y (= t + \Delta t)$ の時の観測ノイズであり、計測装置 212 が算出する。

共分散 $V_{t+\Delta t}$ は、予測値 Y_m の共分散に、カメラの観測ノイズを加えているため、予測値 Y_m と観測値 Y の差の大きさを示す共分散となる。

$$V_{t+\Delta t} = C_{ov} Y_{t+\Delta t} + C_{ov} S_{t+\Delta t} \cdots (10)$$

[0118] (b 7) カルマンゲイン $K_{t+\Delta t}$ を式 (11) で算出する。

$$K_{t+\Delta t} = (C_{ov} X_{t+\Delta t} |_{t} \cdot H_t^T) / (V_{t+\Delta t}) \cdots (11)$$

[0119] (b 8) 内部状態 $X_{t+\Delta t}$ を式 (12) (13) で更新する。なお、更新前の内部状態を $X_{t+\Delta t} |_{t}$ と表記する。なお Y はセンサで計測された観測値である。

$$e Y_{t+\Delta t} = Y_{m_{t+\Delta t} |_{t}} - Y_{t+\Delta t} \cdots (12)$$

$$X_{t+\Delta t} = X_{t+\Delta t} |_{t} - K_{t+\Delta t} \cdot e Y_{t+\Delta t} \cdots (13)$$

[0120] (b 9) 更新後の内部状態の共分散 $C_{ov} X_{t+\Delta t}$ を式 (14) で算出する。

$$C_{ov} X_{t+\Delta t} = (I - K_{t+\Delta t} H_t) C_{ov} X_{t+\Delta t} |_{t} \cdots (14)$$

[0121] 上述した (b 1) から (b 9) までの処理によって、時刻 t_y の観測値に基づいて、内部状態が修正 (すなわち更新) される。内部状態の更新は、ロボット制御装置 220 の制御周期に依らない任意のタイミングで行われる。したがって、システム全体が上記 (a 1) ~ (a 6) の処理を繰り返すことで、内部状態が徐々に真の値 (対象物の実速度など) に近づく。

[0122] 内部状態がどの程度、真の値に近づいているか、を判断するには、上記 (b 5)、(b 6) で求めた予測値の共分散 $C_{ov} Y$ 、 V を評価する。これらの共分散は、現在の推定結果を使って対象物の位置と姿勢を予測した場合の、予測誤差の大きさを表す。

[0123] 事前に定義した状態遷移モデルと観測モデルが正確な場合、観測値と予測値の差 $e Y$ は、共分散 V にしたがった分布となる。したがって、実際の差 $e Y$ が、 V に比べて大きな値となった場合は、事前に定めたモデルが正しくないことを意味する。このような評価には、式 (15) に示すマハラノビス距

離 M_t を用いる。

$$M_t = (e Y_t^T \cdot V_t^{-1} \cdot e Y_t)^{0.5} \dots (15)$$

[0124] そこで状態推定装置214では、(b1)から(b9)の処理後に、現在の状態推定の精度を表す精度指標値Eを、以下のように算出する。

(b10)以下の(c1)(c2)(c3)のいずれかにより精度指標値Eを算出する。

[0125] (c1) $E = \exp(-M_{t+\Delta t}^2 / 2) / ((2\pi)^m |V_{t+\Delta t}|)^{0.5} \dots (16)$

ここでmとYと Y_m と eY とは、同じ数の変数で表される。

(c2) $E = \exp(-M_{t+\Delta t}^2 / 2) / (\text{trace}(C_{ov} Y_{t+\Delta t}))^{0.5} \dots (17)$

(c3) 式(16)または(17)のEを、過去の計測結果全てについて総和したもの。例えば式(18)によるE。ここでpは、内部状態の変数の数である。

[0126] [数1]

$$E = -2 \cdot \left[-\frac{1}{2} \left\{ T(\log(2\pi)) + \sum_{t=1}^T \log(|V_t|) + \sum_{t=1}^T (eY_t^T \cdot V_t^{-1} \cdot eY_t) \right\} \right] + 2p \dots (18)$$

[0127] なお、(c1)の式(16)は、正規分布のモデル適合度の評価式であり、(c3)の式(18)は、情報量基準(AIC)である。

(c2)の式(17)は、分母に共分散 $C_{ov} Y$ のトレースを用いる点に特徴がある。

式(16)において共分散の行列式の平方根は、 eY の分布の体積を表す。一方、式(17)においてトレースの平方根は、分布を包み込む最小の球の半径を表す。

[0128] 次に上記(a5)(a6)におけるロボット制御装置220の処理内容を

以下に示す。

図13は、本発明の第3実施形態による運動予測制御方法の全体フロー図である。この図に示すように、運動予測制御方法は、S1～S12の各ステップ（工程）からなる。

[0129] S1では、ロボット202から手先位置情報などを受信する。ロボット202との通信は、例えば4msの制御周期で行われるようにロボット202が管理する。したがって、ロボット制御装置220は、データを受信するまで待機し、データを受信してから例えば4msの制御周期以内でS12の送信処理を完了しなければならない。

S2では、把持動作中を示すフラグFを判定する。フラグFはプログラム開始時にfalseに初期化されている。

[0130] S3では、把持動作中でない場合、上記(a1)から(a4)の処理を行う。この処理は、別の処理系が任意の実行周期で実施し、ロボット制御装置220は最新の推定結果と精度指標値Eを参照する形式でも良い。

[0131] S4では、現在の状態推定の精度指標値Eから、把持動作を行うか、追従動作を継続するかを判定する。判定手段は以下の(d1)～(d3)のいずれかを用いる。

[0132] (d1) 上述した(c1)の精度指標値Eがある閾値（第1閾値）を超えるかどうかを判定する。式(16)では、マハラノビス距離 M_t が大きい場合、指数関数部が0に近づく。また、共分散Vの体積が大きい場合、分母が大きくなる。したがって、マハラノビス距離 M_t が小さく、かつ、共分散Vの体積が小さい時のみ、把持動作が開始される。

[0133] この例のように2台のカメラ（第1カメラ205aと第2カメラ205b）を用いる場合、対象物201が片方のカメラの視野から外れ、1台のカメラのみで計測を続ける状況が起こりうる。この時、片方の視点でしか計測されないため、共分散 $C_{\nu Y}$ 、Vはカメラの視線方向に細長い分布を示す共分散行列となる。(d1)の手段の場合、Vが細長い場合でも体積は小さくなるので、把持動作が開始される可能性がある。

[0134] (d2) 上述した(c2)の精度指標値Eがある閾値(第3閾値)を超えるかどうかを判定する。式(17)の精度指標値Eは、 $C_{\sigma} \cdot Y$ が細長い分布を表す場合、小さな値となる。したがって、2台のカメラが両方とも対象物201を捉えている時のみ、把持動作が開始される。

[0135] (d3) 上述した(d1)(d2)は、共に、最新の計測結果で判定するが、過去数点分の精度指標値を考慮して判定しても良い。例えば、上述した(c3)のように、過去に算出された精度指標値の対数をとって、総和する方法や、過去一定時間分の平均値をとる方法などが挙げられる。

[0136] S5では、把持動作をしない場合、把持動作中フラグFはfalseとする。

S6では、把持動作をしない場合、例えば以下の式(19)(20)(21)のようにアーム速度 V_x 、 V_y 、 V_z を設定する。

$$V_x = K_{p_x} \cdot (m_x - r_x) + K_{d_x} \cdot (m_x - r_x - p_{r_x}) \dots \quad (19)$$

$$V_y = K_{p_y} \cdot (m_y - r_y) + K_{d_y} \cdot (m_y - r_y - p_{r_y}) \dots \quad (20)$$

$$V_z = K_{p_z} \cdot (m_z - r_z) + K_{d_z} \cdot (m_z - r_z - p_{r_z}) \dots \quad (21)$$

[0137] この制御は、PD制御であり、 m_x 、 m_y 、 m_z は、計測された対象物の現在位置[mm]、 r_x 、 r_y 、 r_z は追従制御点(カメラの視線上の点)の現在位置[mm]、 p_{r_x} 、 p_{r_y} 、 p_{r_z} は、前回のステップで算出された位置偏差($m_y - r_y$ 、 $m_z - r_z$ など)、 K_p は位置制御ゲイン、 K_d は微分制御ゲインである。

[0138] S7では、S4で把持動作を行うと判定された場合は、状態遷移モデルと観測モデルを用いて、未来の対象物201の位置と姿勢を予測し、把持位置Aとする。

S8では、把持動作開始時に、把持動作中フラグFをtrueにする。

S9では、把持動作中は、ロボットアーム203が把持位置Aに移動する

ように、ロボットアーム203の目標速度を算出する。

S10では、把持動作が終了したかどうかを判定する。例えば、ロボットアーム203が把持位置Aに到達して、ハンド204を閉じる動作が終了している場合に把持動作終了と判定する。

S11では、把持動作を終了する場合、把持動作フラグFをfalseにする。把持動作を終了しない場合は、把持動作フラグFはtrueのままなので、S2の分岐により、次回以降も把持動作が継続される。

S12では、算出された目標速度やハンド開閉指令値をロボット202に送信する。

[0139] なお上述の例では、対象物201の運動状態を推定する方法として、カルマンフィルタを用いたが、以下のような条件を満たす状態推定手法であれば、他の手法を用いても良い。例えば、パーティクルフィルタ、最小自乗法などを適用できる。

(e1) 対象物201の運動状態を推定して、未来の位置を予測できること。

(e2) 未来の位置を予測した時の予測誤差の分散を表す共分散行列を算出できること。

[0140] 上述のc1では、Vの行列式を使った判定の例を示しているが、V、 C_{ov} 、Yのどちらの行列式を使っても構わない。また、上述のc2では、 C_{ov} 、Yのtraceを使った判定の例を示しているが、V、 C_{ov} 、Yのどちらのtraceを使っても構わない。

すなわち「誤差の分散を予想した共分散行列」は、V、 C_{ov} 、Yのどちらを用いたものであってもよい。

実施例 1

[0141] 図14は、実施例における経過時間と精度指標値Eとの関係を示す図である。

この例は、上述した(c2)の式(17)で、精度指標値Eを算出した結果である。

[0142] この図から計測開始時から精度指標値Eは徐々に大きくなり、計測開始から経過時間が2秒後以降は80以上で安定することがわかる。

したがって、式(17)の精度指標値Eが80以上であることを把持動作開始条件とすれば、把持失敗しにくくなるといえる。

[0143] また、この図で経過時間が1秒付近に見られるように、一時的に精度指標値が高くなる場合がある。したがって、上述した(c3)のように、過去数点分の精度指標値を考慮して判定することが好ましい。

[0144] 例えば、過去数点の平均値が80を超えている、一定時間以上連続して80を超えているなどを考慮する。

例えば、「120ms以上連続して、精度指標値が80を超えている」ことを把持動作開始条件とするのがよい。

[0145] 上述した本発明の第3実施形態の装置と方法によれば、計測装置212及び状態推定装置214により、対象物201の位置又は姿勢を計測し、対象物201の内部状態を推定するので、等速直線運動、等速円運動、等加速度直線運動以外の運動であっても対象物201(例えばワーク)の内部状態(例えば位置、姿勢、速度、角速度)に基づいて対象物201の運動予測をすることができる。

[0146] また、状態推定装置214により、状態遷移モデルと観測モデルに基づいて、精度指標値Eを含む対象物201の内部状態を推定し、精度指標値Eから対象物201の把持の可否を判定するので、把持不可の場合、ロボット制御装置220により、例えば対象物201の位置と姿勢の計測を継続できるようにロボット202を移動させることで、予測精度が低下する場合でも把持の失敗を未然に回避することができる。

[0147] さらに、把持可能の場合に、ロボット制御装置220により、内部状態の推定結果に基づいて対象物201の移動先を予測してロボット202を把持動作するので、ロボット202を対象物201に追従させて確実に把持することができる。

[0148] 上述した例では、対象物201が移動しロボット202が固定されている

が、本発明の第3実施形態はこの例に限定されず、対象物が動かずにロボットが移動する場合でも、対象物とロボットの両方が移動する場合でもよい。

したがって、本発明の第3実施形態における「対象物の移動」は、ロボットから見た対象物の相対的な移動を意味する。

[0149] なお、本発明の第3実施形態は上述した構成例に限定されず、特許請求の範囲の記載によって示され、さらに特許請求の範囲の記載と均等の意味および範囲内でのすべての変更を含むものである。

符号の説明

[0150] 1 ワーク（対象物）、2 ロボット、
3 ロボットアーム、4 ハンド、
5 a 第1カメラ、5 b 第2カメラ、6 ランドマーク、
10 運動予測制御装置、12 計測装置、
12 a 第1計測装置、12 b 第2計測装置、12 c 第3計測装置
14 状態推定装置、15 a 全体予測部、
15 b 更新部、16 データ記憶装置、
20 ロボット制御装置、21 受信部、
22 指令値算出部、23 送信部、
24 ロボット上予測部、26 ロボット上記憶部
101 ロボット（自ロボット、他ロボット）、
102 ランドマーク、103 内部センサ、
103 a ジャイロセンサ、103 b 測距センサ（LRF）、
103 c 車輪用エンコーダ、103 d カメラ、103 e GPSコンパス、
103 f ステア角エンコーダ、104 外部センサ、
110 運動予測制御装置、112 計測装置、114 状態推定装置、
115 a 全体予測部、115 b 更新部、116 データ記憶装置、
120 ロボット制御装置、120 A 第1ロボット制御装置、
120 B 第2ロボット制御装置、120 C 第3ロボット制御装置、

1 2 1 駆動部、1 2 2 車両制御部、
1 2 2 a 指令値算出部、1 2 3 行動計画部、
1 2 3 a ロボット上予測部、1 2 3 b 軌道生成部、1 2 4 計測部、
1 2 5 通信部、1 2 6 ロボット上記憶部
2 0 1 ワーク（対象物）、2 0 2 ロボット、
2 0 3 ロボットアーム、2 0 4 ハンド、
2 0 5 a 第1カメラ、2 0 5 b 第2カメラ、
2 1 0 運動予測制御装置、2 1 2 計測装置、
2 1 2 a 第1計測装置、2 1 2 b 第2計測装置、
2 1 4 状態推定装置、2 1 6 データ記憶装置、
2 2 0 ロボット制御装置

請求の範囲

- [請求項1] 対象物とロボット的一方または両方を計測することによりセンサ情報を取得する計測装置と、
- センサ情報に基づいて、対象物とロボット的一方または両方の内部状態を予測して更新する状態推定装置と、
- 前記内部状態を記憶するデータ記憶装置と、
- 前記ロボットを制御するロボット制御装置と、を備え、
- 状態推定装置は、ロボットの制御周期に依らない任意のタイミングで、前記内部状態を更新し、
- ロボット制御装置は、前記制御周期で、データ記憶装置に記憶された最新の内部状態に基づいて、ロボットの制御に必要な予測値を算出する、ことを特徴とする運動予測制御装置。
- [請求項2] 計測装置は、対象物やロボット間の相対関係を前記センサ情報として計測し、状態推定装置は、対象物やロボットの内部状態を予測して更新し、
- 前記状態推定装置は、前記内部状態を予測する全体予測部と、データ記憶装置に記憶された内部状態を更新する更新部とを有し、
- 前記ロボット制御装置は、前記ロボットの制御周期でその制御に必要な予測値を予測するロボット上予測部を有しており、
- (A) 前記制御周期に依らない任意のタイミングで、前記計測装置、状態推定装置、及びデータ記憶装置により、対象物やロボット間の相対関係を計測し、対象物やロボットの内部状態を予測して更新し、更新した内部状態と予測に用いた状態遷移方程式を記憶し、
- (B) 前記ロボット制御装置により、データ記憶装置に記憶された最新の内部状態に基づき、前記制御周期で、前記予測値を予測し、予測値に基づいてロボットをリアルタイムに制御する、ことを特徴とする請求項1に記載の運動予測制御装置。
- [請求項3] 前記ロボット制御装置は、データ記憶装置に記憶された最新の内部

状態を記憶するロボット上記憶部を有し、

前記データ記憶装置は、ロボットからの要求に依らないタイミングで、データ記憶装置に記憶された最新の内部状態をロボット上記憶部に転送する、ことを特徴とする請求項2に記載の運動予測制御装置。

[請求項4] 前記内部状態は、対象物やロボットの位置又は姿勢、もしくは、対象物が吊るされている振り子の振れ角又は振り子の支点位置を示す状態変数である、ことを特徴とする請求項2に記載の運動予測制御装置。

[請求項5] 計測する前記相対関係は、対象物やロボット間の相対位置又は姿勢である、ことを特徴とする請求項2に記載の運動予測制御装置。

[請求項6] 計測する前記相対関係は、対象物やロボット間の相対速度又は姿勢変化である、ことを特徴とする請求項2に記載の運動予測制御装置。

[請求項7] 計測装置は、ロボットの制御周期に依らない任意のタイミングで、対象物や複数のロボットのセンサ情報を取得し、

状態推定装置は、前記センサ情報を取得したときに、センサ情報を取得した時刻と同時刻の各ロボットの内部状態を予測して、予測した内部状態をセンサ情報と比較して更新し、

データ記憶装置は、前記更新が行われたときに、更新した内部状態と予測に用いた状態遷移方程式を記憶し、

複数のロボット制御装置は、データ記憶装置に記憶された最新の内部状態に基づき、各ロボットに必要な予測値を予測する、ことを特徴とする請求項1に記載のロボットの運動予測制御装置。

[請求項8] 前記複数のロボット制御装置は、各ロボットの制御周期で、各ロボットの制御に必要な予測値を予測し、複数のロボットをリアルタイムに制御する、ことを特徴とする請求項7に記載の運動予測制御装置。

[請求項9] 状態推定装置は、前記内部状態を予測する全体予測部と、全体予測部が予測した内部状態を更新する更新部とを有し、

各ロボット制御装置は、各ロボットの制御周期でその制御に必要な

予測値を予測するロボット上予測部を有する、ことを特徴とする請求項 7 に記載の運動予測制御装置。

[請求項10] 各ロボット制御装置は、データ記憶装置に記憶された最新の内部状態を記憶するロボット上記憶部を有し、

データ記憶装置は、ロボットからの要求に依らないタイミングで、データ記憶装置に記憶された最新の内部状態をロボット上記憶部に転送する、ことを特徴とする請求項 7 に記載の運動予測制御装置。

[請求項11] 前記内部状態は、ロボットの位置、姿勢、速度、又は角速度を示す状態変数である、ことを特徴とする請求項 7 に記載の運動予測制御装置。

[請求項12] 前記ロボットは、相対的に移動する対象物を把持するものであり、計測装置は、対象物の位置又は姿勢を前記センサ情報として計測し、

状態推定装置は、対象物を計測した計測結果から、状態遷移モデルと観測モデルに基づいて、精度指標値を含む対象物の内部状態を更新し、かつ精度指標値から対象物の把持の可否を判定し、

把持可能な場合、ロボット制御装置は、内部状態の更新結果に基づいて対象物の移動先を予測して把持動作するようにロボットを制御する、ことを特徴とする請求項 1 に記載の運動予測制御装置。

[請求項13] (A) 対象物とロボット的一方または両方を計測装置で計測することによりセンサ情報を取得し、

(B) センサ情報に基づいて、対象物とロボット的一方または両方の内部状態を状態推定装置により予測して更新し、

(C) 前記内部状態をデータ記憶装置により記憶し、

(D) 前記ロボットをロボット制御装置により制御し、

前記 (B) において、状態推定装置により、ロボットの制御周期に依らない任意のタイミングで、前記内部状態を更新し、

前記 (D) において、ロボット制御装置により、前記制御周期で、

データ記憶装置に記憶された最新の内部状態に基づいて、ロボットの制御に必要な予測値を算出する、ことを特徴とする運動予測制御方法。

[請求項14]

前記状態推定装置は、前記内部状態を予測する全体予測部と、データ記憶装置に記憶された内部状態を更新する更新部とを有するものであり、

前記(A)～(C)において、前記制御周期に依らない任意のタイミングで、前記計測装置、状態推定装置、及びデータ記憶装置により、対象物やロボット間の相対関係を前記センサ情報として計測し、対象物やロボットの内部状態を予測して更新し、更新した内部状態と予測に用いた状態遷移方程式を記憶し、

前記(D)において、前記ロボット制御装置により、データ記憶装置に記憶された最新の内部状態に基づき、前記制御周期で、前記予測値を予測し、ロボットをリアルタイムに制御する、ことを特徴とする請求項13に記載の運動予測制御方法。

[請求項15]

ロボットの制御周期に依らない任意のタイミングで、前記(A)において、計測装置により対象物や複数のロボットのセンサ情報を取得し、前記(B)において、状態推定装置によりセンサ情報を取得した時刻と同時刻の各ロボットの内部状態を予測して、予測した内部状態をセンサ情報と比較して更新し、前記(C)において、データ記憶装置により、更新した内部状態と予測に用いた状態遷移方程式を記憶し、

前記(D)において、複数のロボット制御装置により、データ記憶装置に記憶された最新の内部状態に基づき、各ロボットに必要な予測値を予測する、ことを特徴とする請求項13に記載のロボットの運動予測制御方法。

[請求項16]

前記(D)において、各ロボットの制御周期で、各ロボットの制御に必要な予測値を予測し、複数のロボットをリアルタイムに制御する

、ことを特徴とする請求項 1 5 に記載の運動予測制御方法。

[請求項17] 前記制御周期は、計測装置の処理間隔よりも短い一定周期である、ことを特徴とする請求項 1 4 または 1 5 に記載の運動予測制御方法。

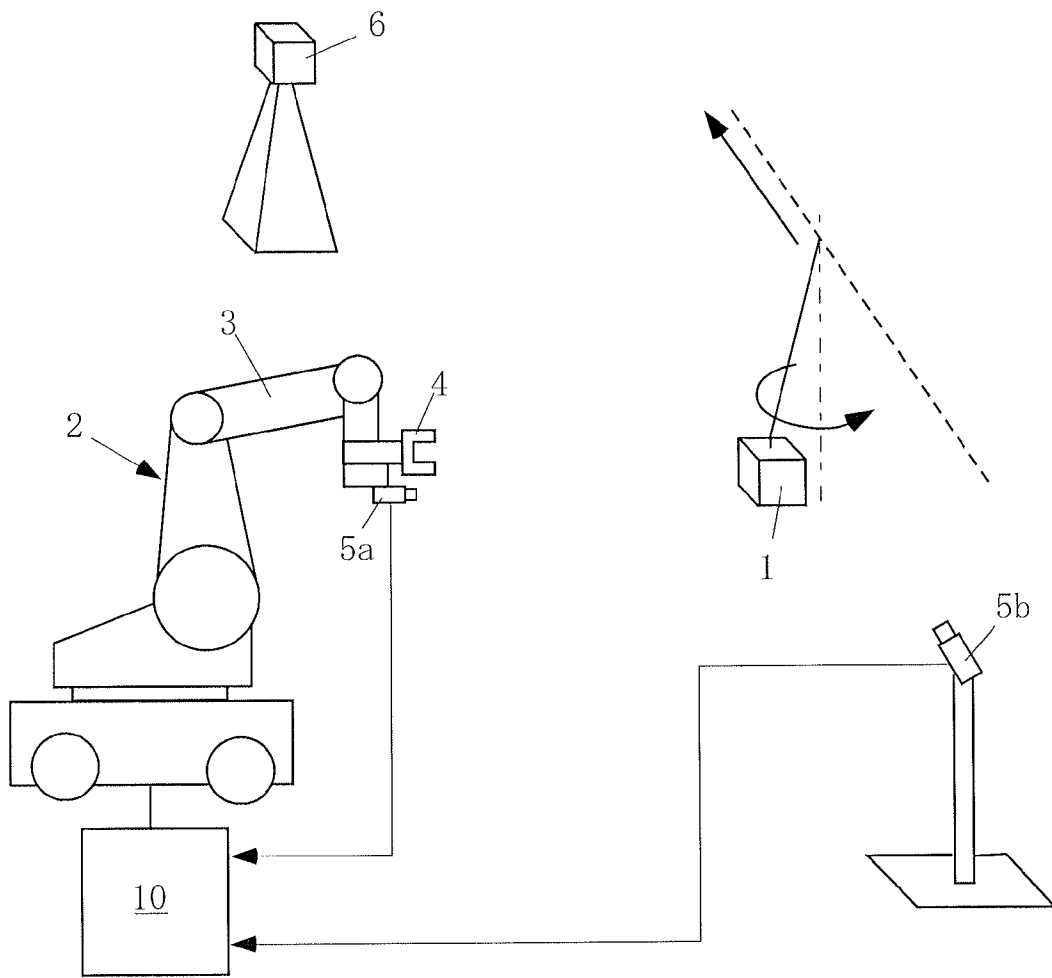
[請求項18] 前記ロボットは、相対的に移動する対象物を把持するものであり、前記 (A) において、計測装置により、対象物の位置又は姿勢を前記センサ情報として計測し、

前記 (B) において、計測した計測結果から、状態推定装置により、状態遷移モデルと観測モデルに基づいて、精度指標値を含む対象物の内部状態を更新し、かつ精度指標値から対象物の把持の可否を判定し、

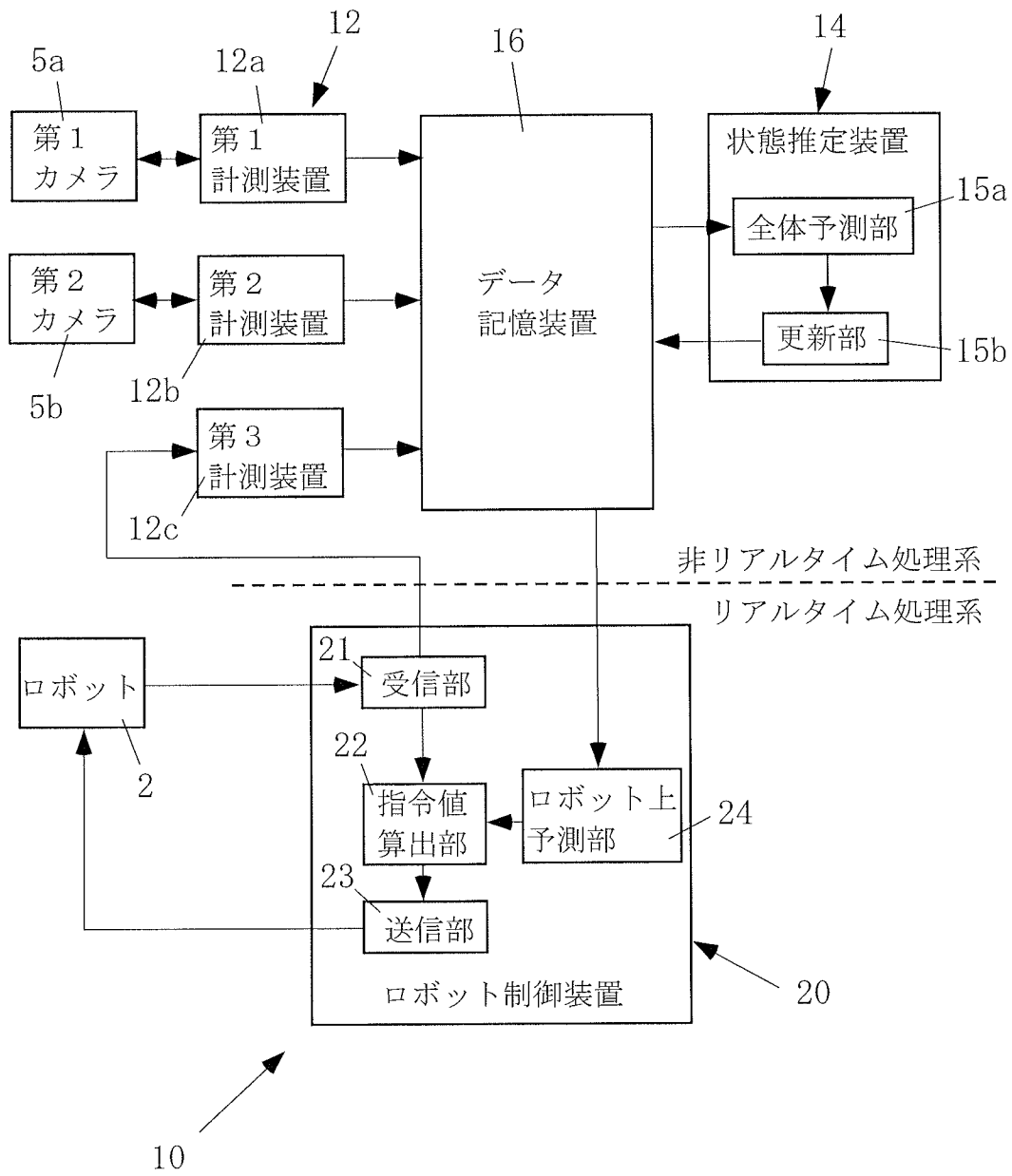
前記 (D) において、把持可能の場合、ロボット制御装置により、内部状態の更新結果に基づいて対象物の移動先を予測してロボットに把持動作をさせ、

把持不可の場合、把持可能となるまで、前記 (A) と (B) を繰り返す、ことを特徴とする請求項 1 3 に記載の運動予測制御方法。

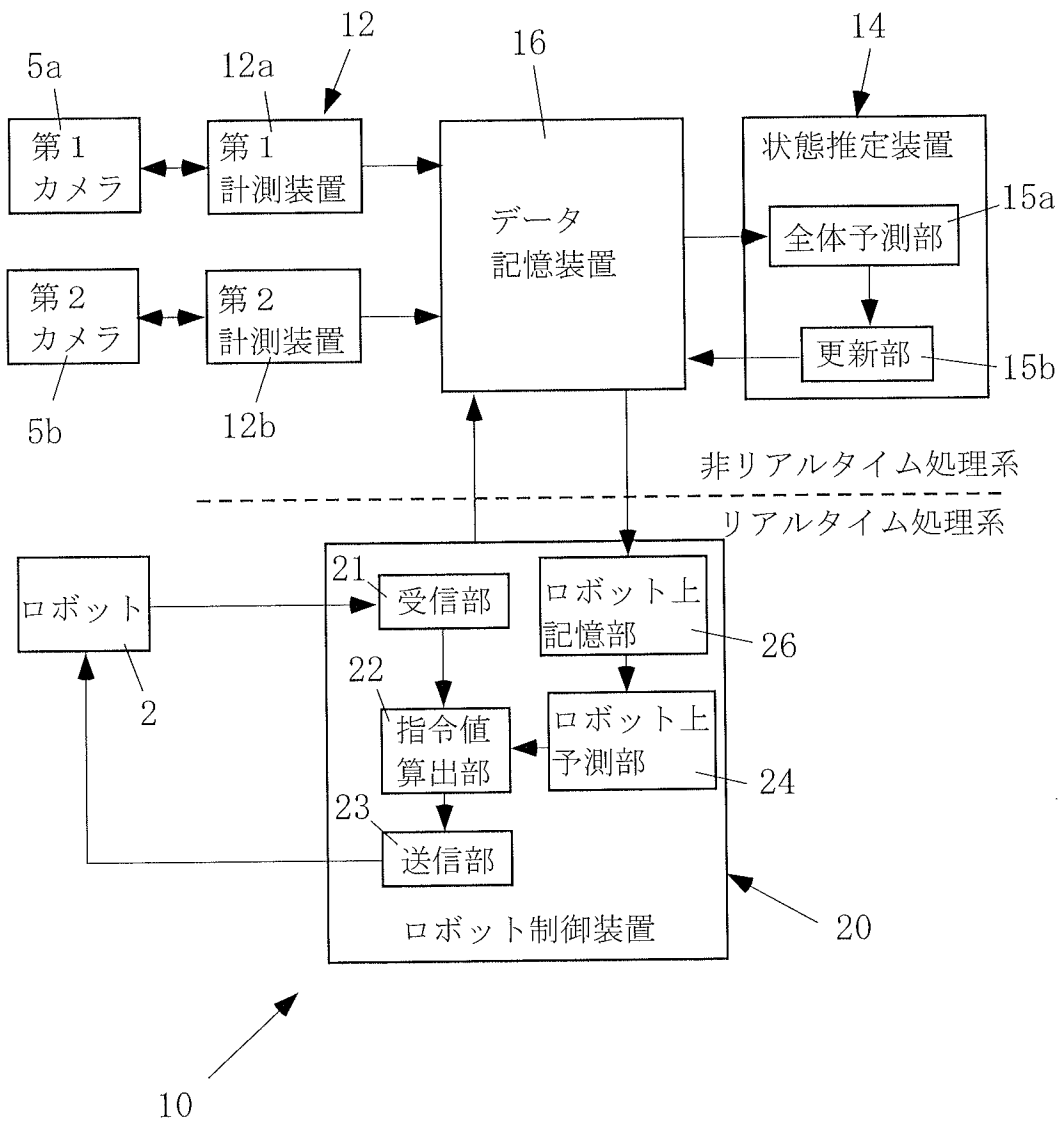
[図1]



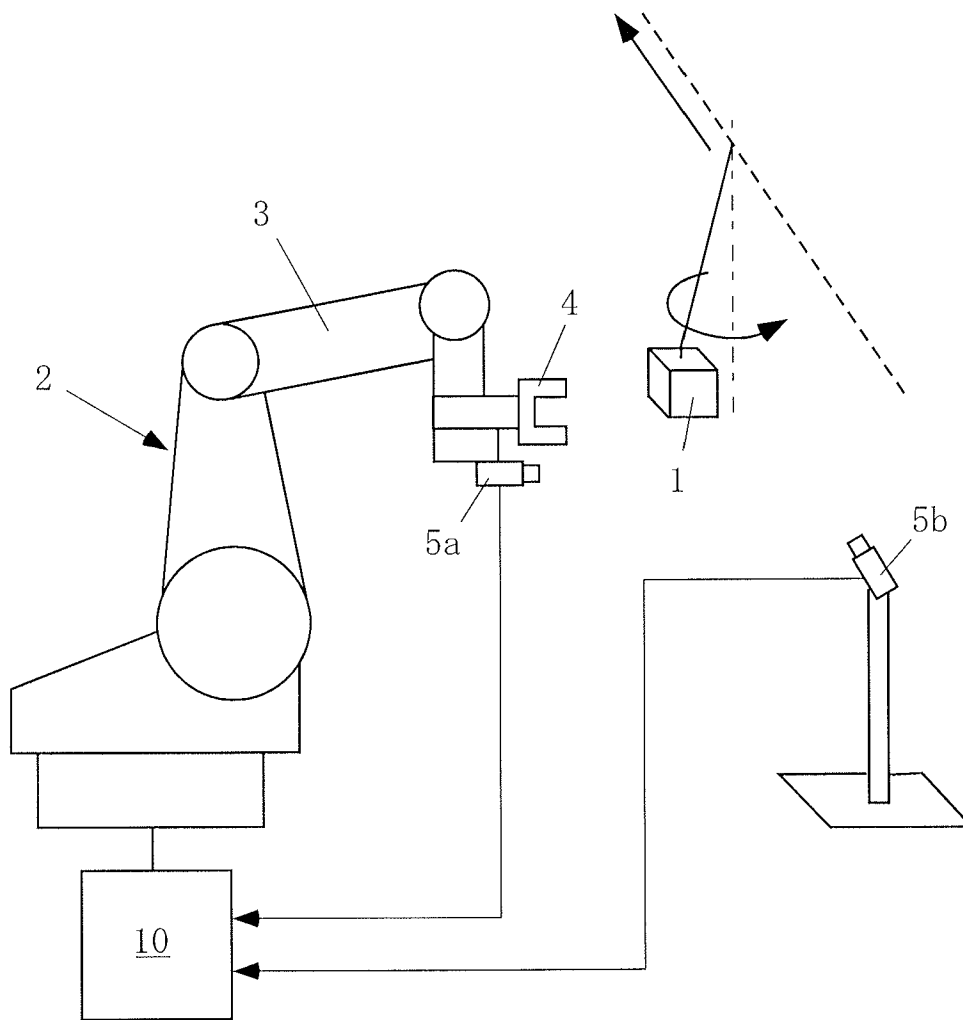
[図2]



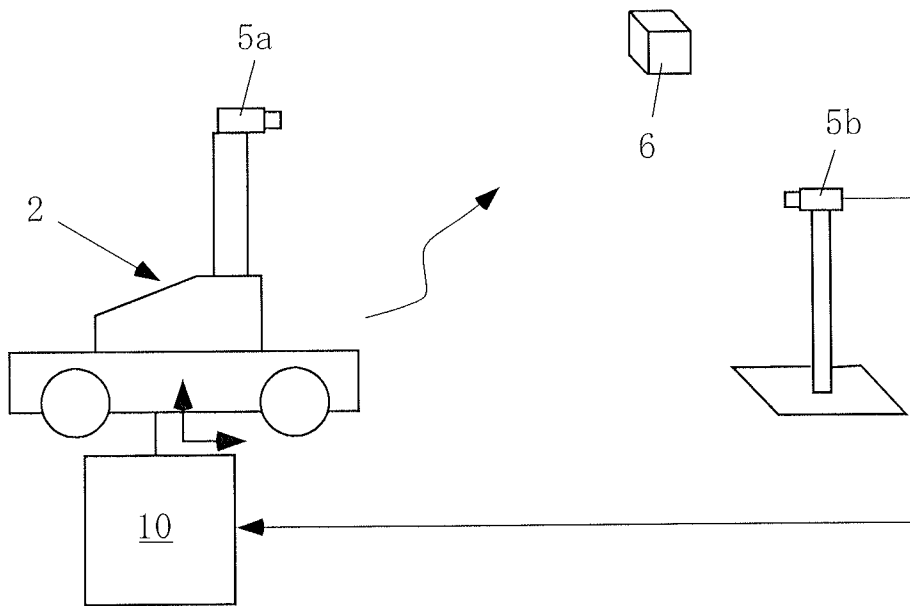
[図3]



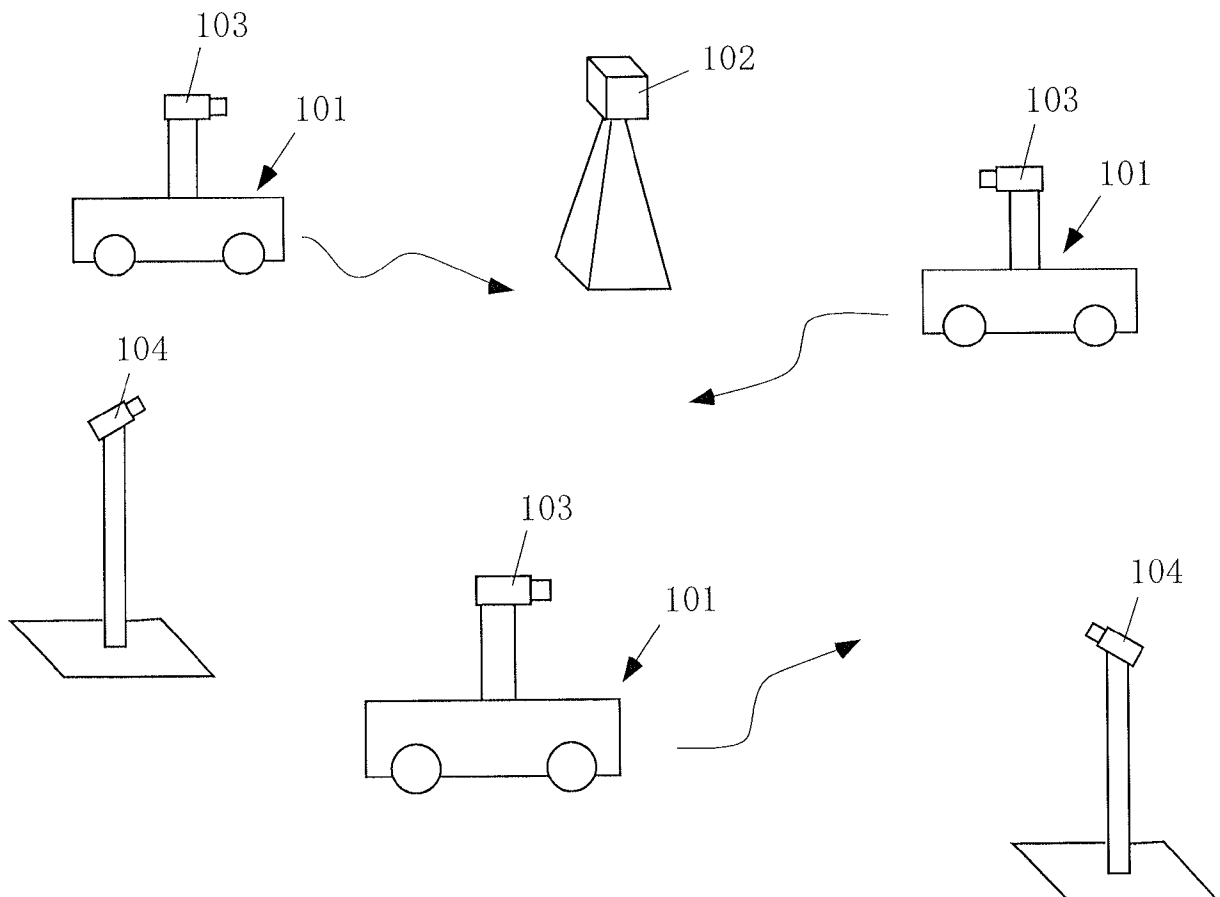
[図4]



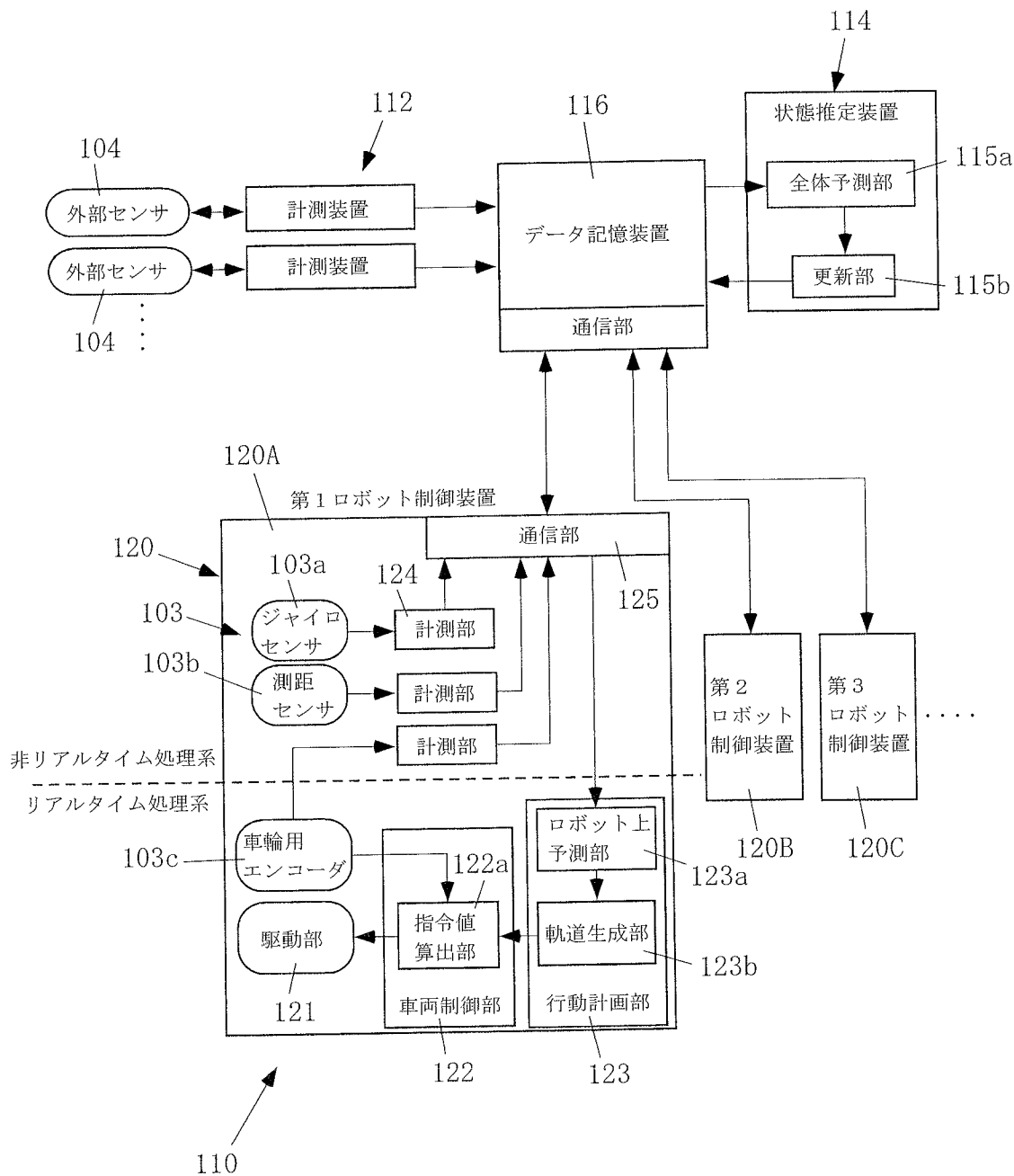
[図5]



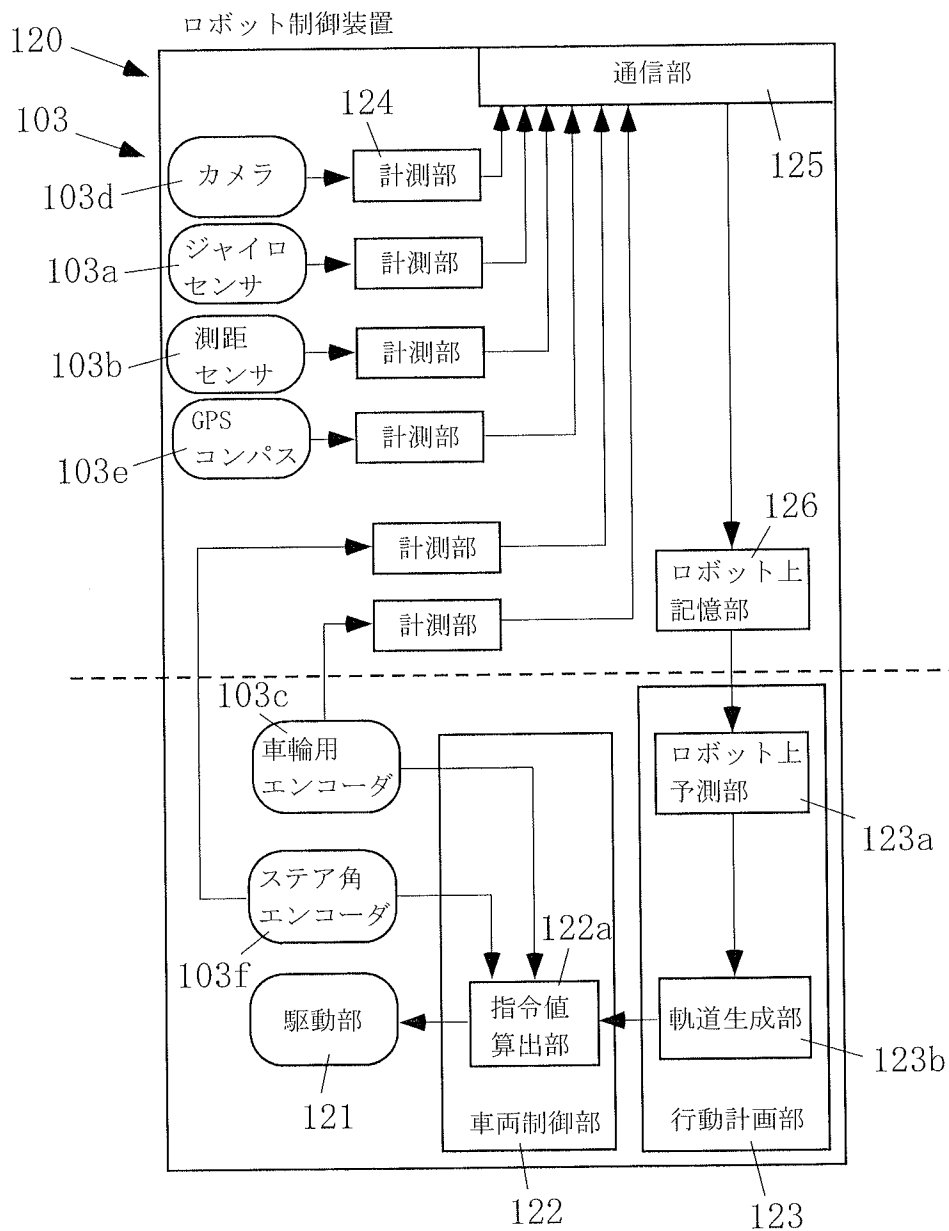
[図6]



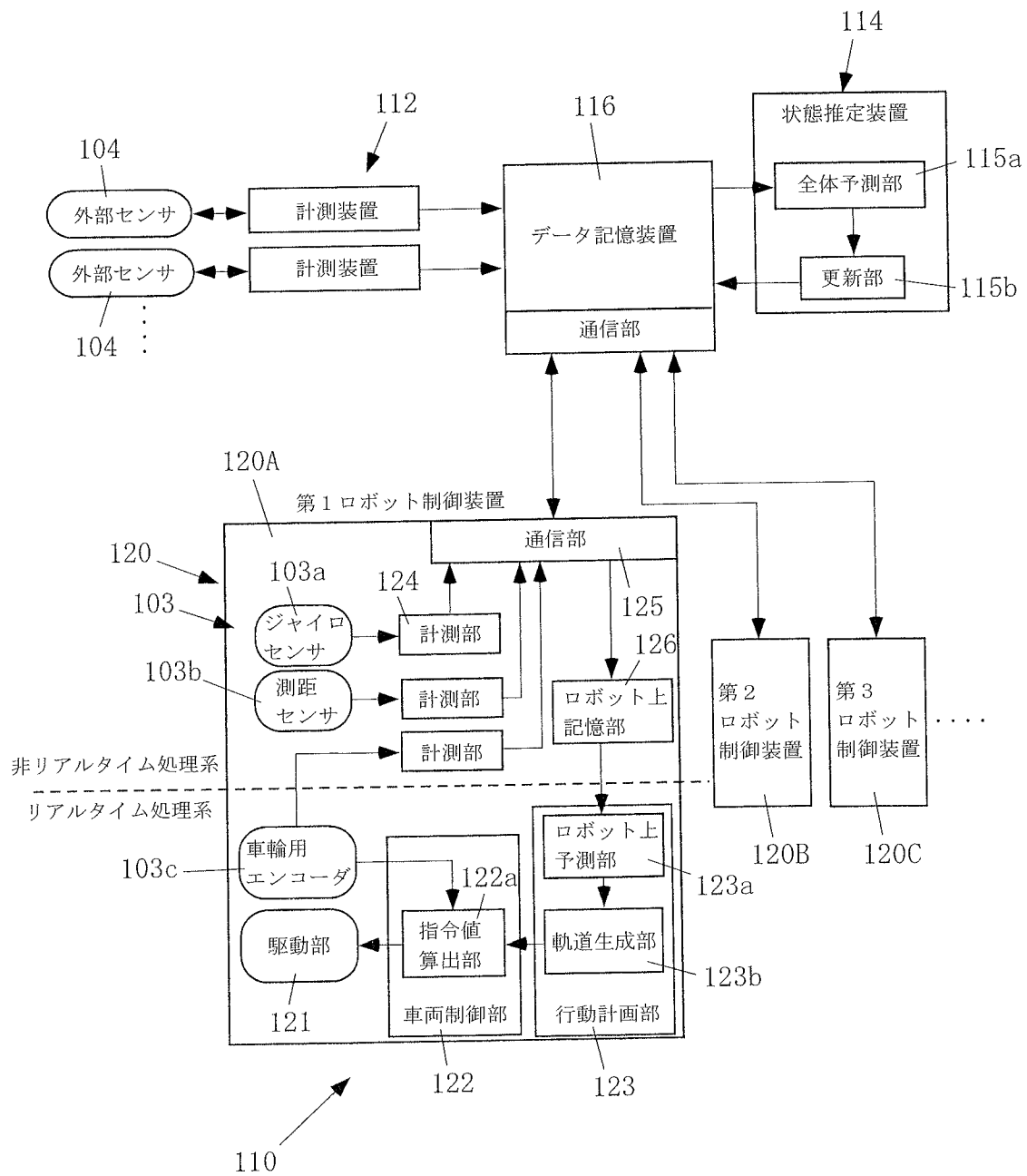
[図7]



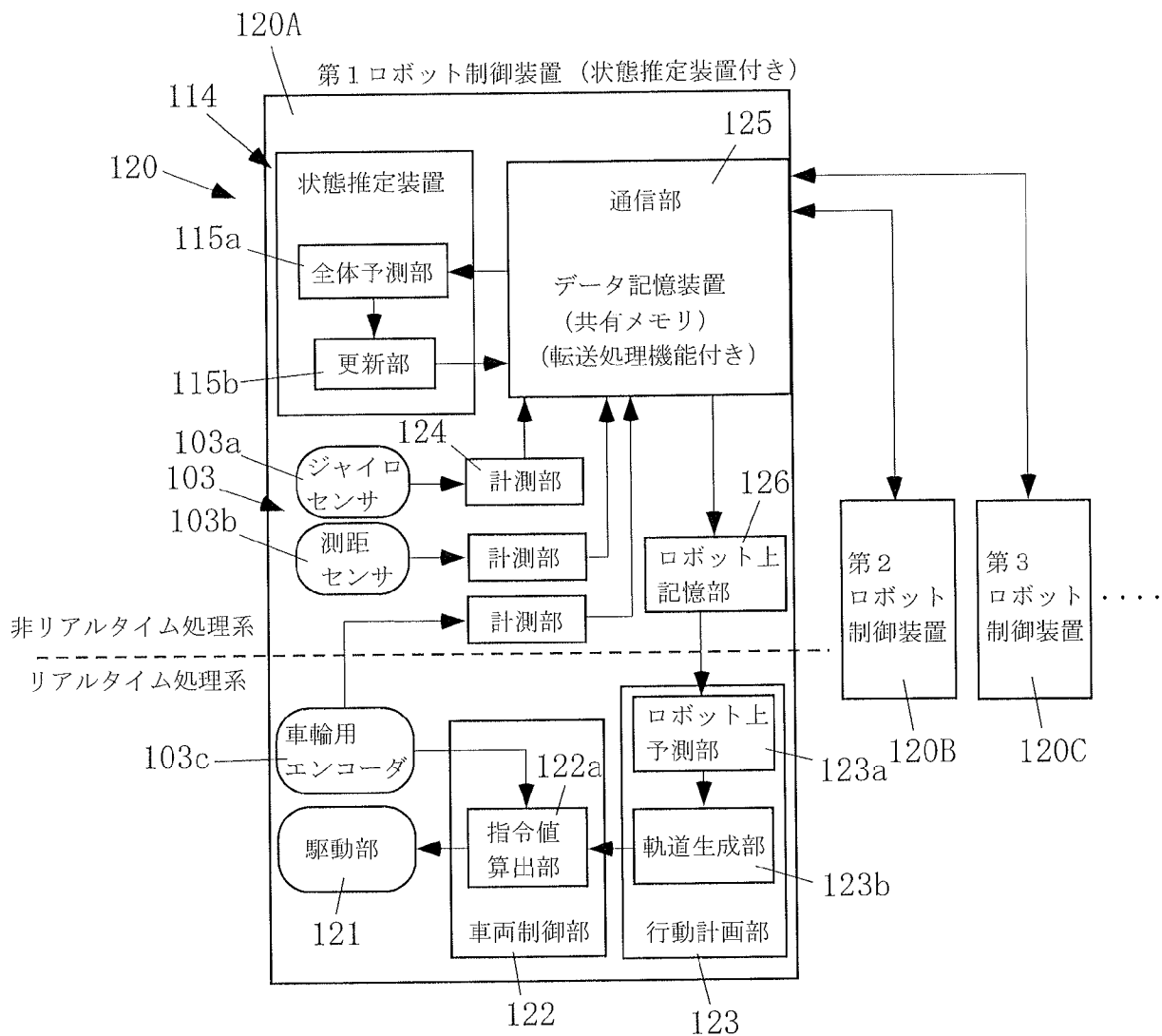
[図8]



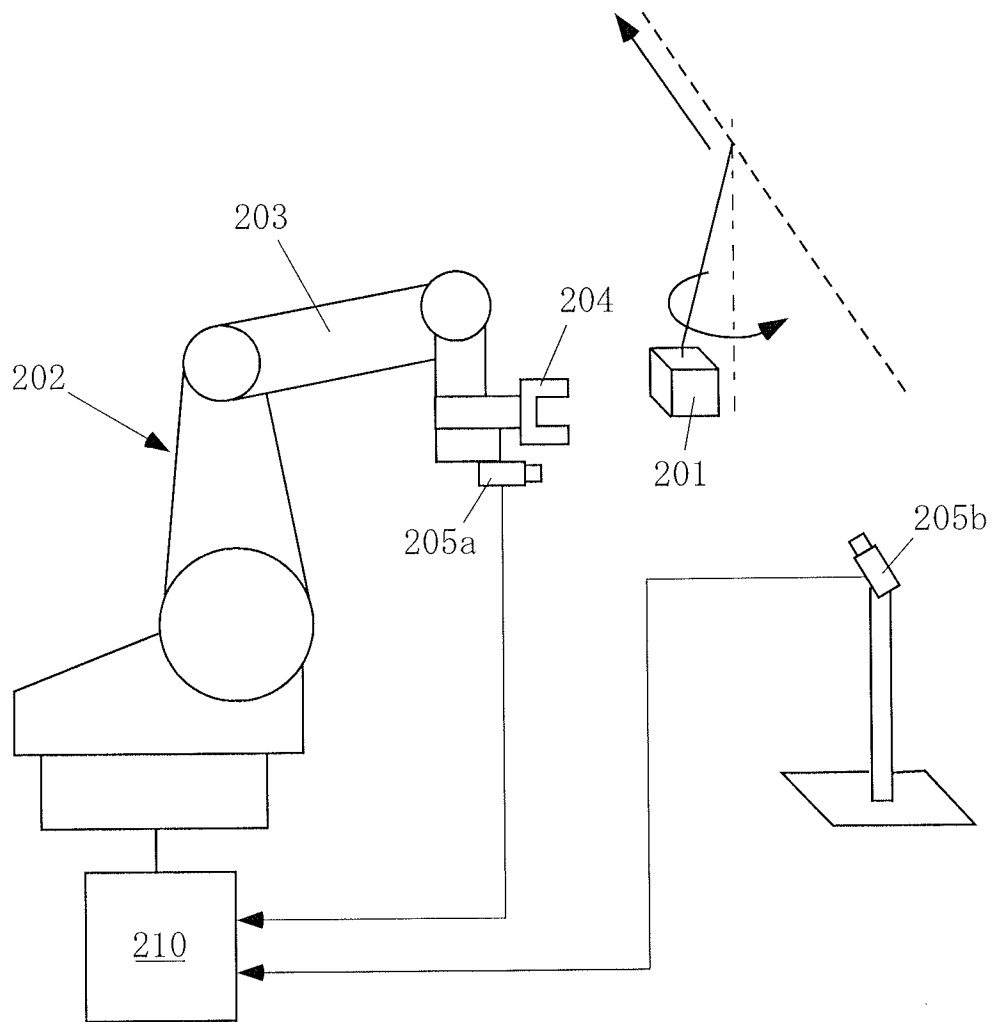
[図9]



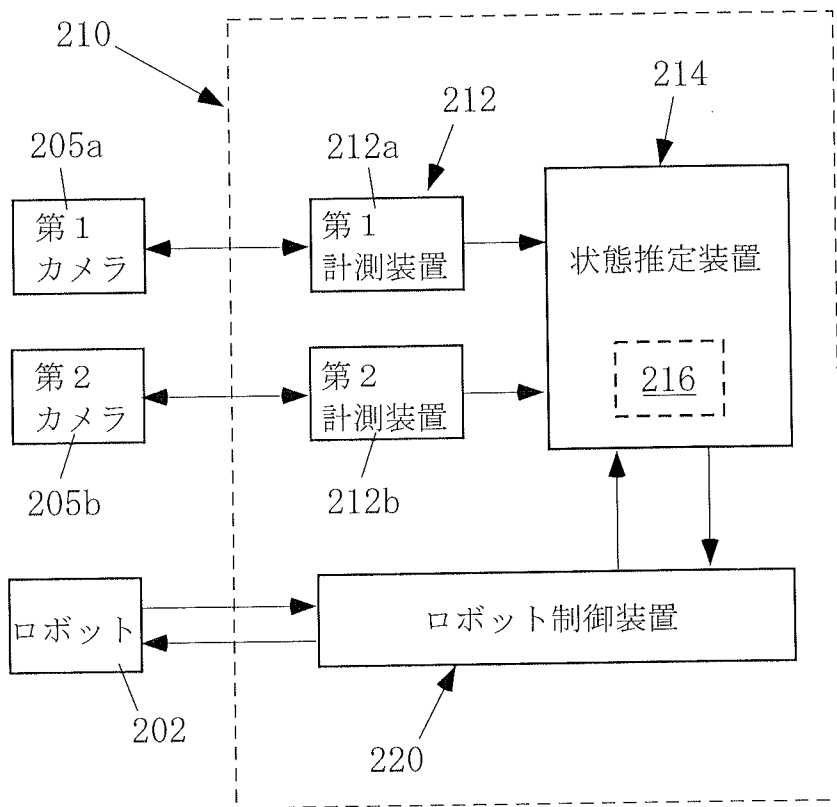
[図10]



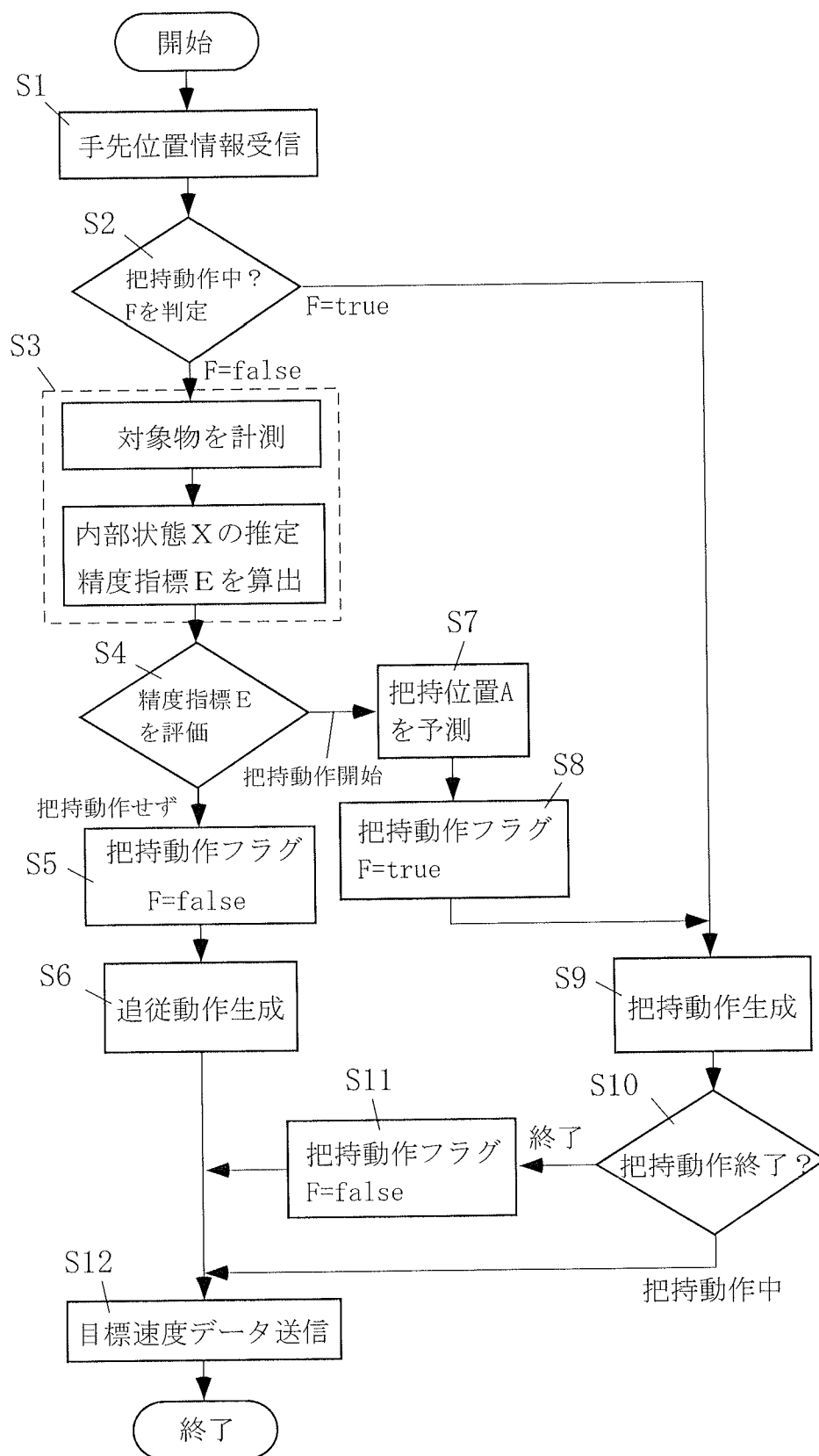
[図11]



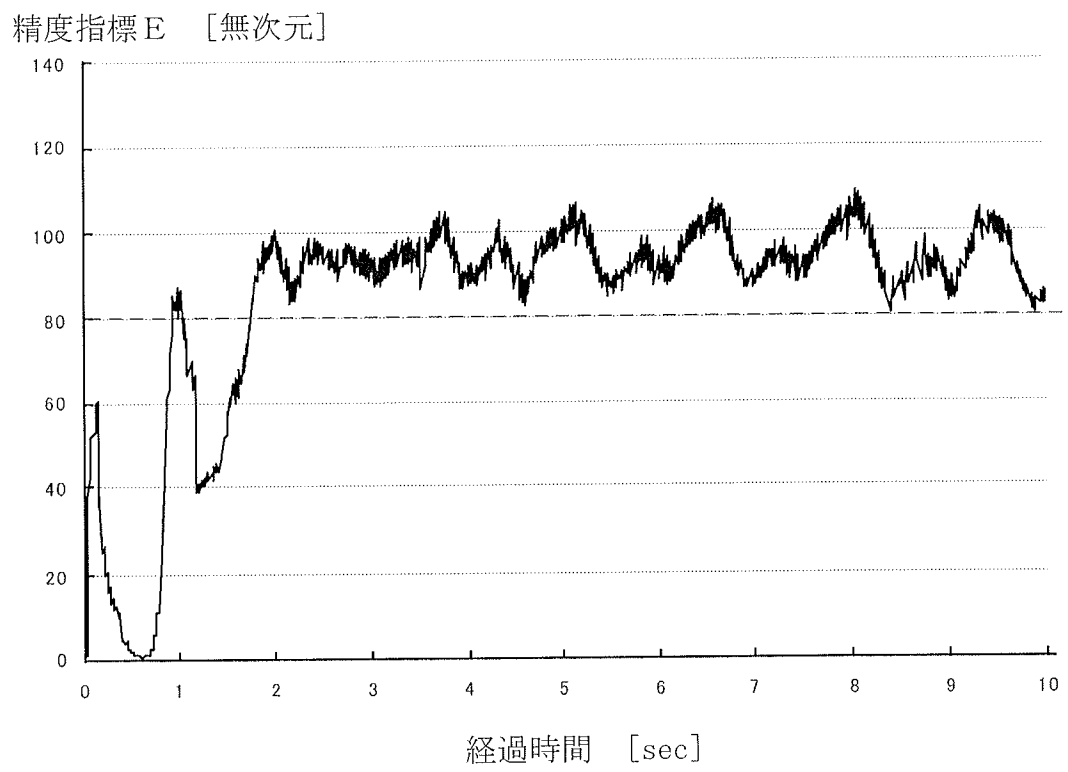
[図12]



[図13]



[図14]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/060918

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B25J13/00(2006.01) i, B25J13/08(2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B25J13/00, B25J13/08

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2012
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2012	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2012

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 7-19818 A (Kajima Corp.), 20 January 1995 (20.01.1995), entire text; all drawings (Family: none)	1-6, 12-13, 18
Y	JP 2011-209203 A (Sony Corp.), 20 October 2011 (20.10.2011), entire text; all drawings (Family: none)	1-6, 12-13, 18
A	JP 11-327620 A (Yaskawa Electric Corp.), 26 November 1999 (26.11.1999), entire text; all drawings (Family: none)	1-18

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
- "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
20 July, 2012 (20.07.12)

Date of mailing of the international search report
07 August, 2012 (07.08.12)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/060918

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 11-24718 A (Toshiba Corp.), 29 January 1999 (29.01.1999), entire text; all drawings (Family: none)	1-18

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))
 Int.Cl. B25J13/00(2006.01)i, B25J13/08(2006.01)i

B. 調査を行った分野
 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))
 Int.Cl. B25J13/00, B25J13/08

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの
 日本国実用新案公報 1922-1996年
 日本国公開実用新案公報 1971-2012年
 日本国実用新案登録公報 1996-2012年
 日本国登録実用新案公報 1994-2012年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 7-19818 A (鹿島建設株式会社) 1995. 01. 20, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-6、12 -13、18
Y	JP 2011-209203 A (ソニー株式会社) 2011. 10. 20, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-6、12 -13、18

C欄の続きにも文献が列挙されている。 パテントファミリーに関する別紙を参照。

<p>* 引用文献のカテゴリー 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願</p>	<p>の日の後に公表された文献 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」同一パテントファミリー文献</p>
---	---

国際調査を完了した日 20.07.2012	国際調査報告の発送日 07.08.2012
--------------------------	--------------------------

国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	特許庁審査官 (権限のある職員) 金丸 治之	3U	9535
	電話番号 03-3581-1101 内線 3324		

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 11-327620 A (株式会社安川電機) 1999. 11. 26, 全文、全図 (ファミリーなし)	1 - 18
A	JP 11-24718 A (株式会社東芝) 1999. 01. 29, 全文、全図 (ファミリーなし)	1 - 18