

(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
2013年12月5日(05.12.2013)



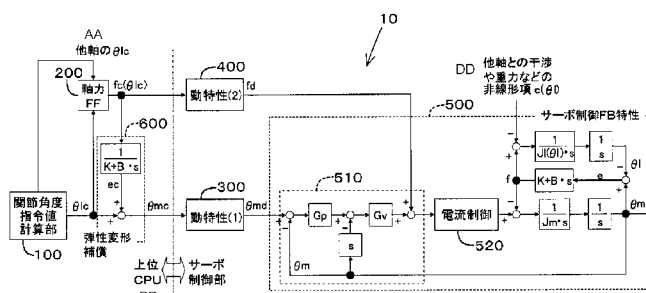
(10) 国際公開番号
WO 2013/180223 A1

- (51) 国際特許分類:
B25J 9/10 (2006.01) B23K 9/12 (2006.01)
B23K 9/095 (2006.01) G05B 19/4093 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2013/065057
- (22) 国際出願日: 2013年5月30日(30.05.2013)
- (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 2012-123239 2012年5月30日(30.05.2012) JP
- (71) 出願人: 株式会社神戸製鋼所(KABUSHIKI KAISHA KOBE SEIKO SHO (KOBELCO STEEL, LTD.)) [JP/JP]; 〒6518585 兵庫県神戸市中央区脇浜海岸通二丁目2番4号 Hyogo (JP).
- (72) 発明者: 西田 吉晴(NISHIDA Yoshiharu), 和田 堯(WADA Takashi), 井上 芳英(INOUE Yoshihide), 稲田 修一(INADA Shuichi).
- (74) 代理人: 濱田 百合子, 外(HAMADA Yuriko et al.); 〒1050003 東京都港区西新橋一丁目7番13号 虎ノ門イーストビルディング10階 栄光特許事務所 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, BN, 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, 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, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, 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, 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, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:
— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

(54) Title: ELASTIC-DEFORMATION-COMPENSATION CONTROL DEVICE FOR ARTICULATED ROBOT, AND CONTROL METHOD

(54) 発明の名称: 多関節ロボットの弾性変形補償制御装置および制御方法



- 100 Joint-angle-command-value calculation unit
- 200 Axial force feedforward (FF)
- 300 Dynamic characteristic (1)
- 400 Dynamic characteristic (2)
- 500 Servo control feedback (FB) characteristic
- 520 Current control
- 600 Elastic deformation compensation
- AA $\theta | c$ of other axis
- BB Host CPU
- CC Servo controller
- DD Nonlinear term ($c(\theta |)$) such as interference with other axis, gravitational force, or the like

(57) Abstract: In an elastic-deformation-compensation control device (10), a first dynamic characteristic calculation unit (300) performs filtering processing with respect to a motor-angle command value (θ_{mc}) outputted from a motor-angle-command-value calculation unit (600), and outputs a processed motor-angle target value (θ_{md}). A second dynamic characteristic calculation unit (400) is provided with a high-frequency cutoff characteristic having a cutoff frequency which is lower than that of the first dynamic characteristic calculation unit (300), performs filtering processing with respect to the output from an axial force torque calculation unit (200), and outputs a processed axial force torque compensation value (f_d).

(57) 要約: 弾性変形補償制御装置(10)において、第1の動特性演算部(300)は、モータ角度指令値計算部(600)から出力されたモータ角度指令値(θ_{mc})をフィルタリング処理して処理後のモータ角度目標値(θ_{md})を出力する。第2の動特性演算部(400)は、第1の動特性演算部(300)よりも低いカットオフ周波数を有する高周波遮断特性を備え、軸力トルク計算部(200)からの出力をフィルタリング処理して、処理後の軸力トルク補償値(f_d)を出力する。

WO 2013/180223 A1

明 細 書

発明の名称：

多関節ロボットの弾性変形補償制御装置および制御方法

技術分野

[0001] 本発明は、たとえばアーク溶接に用いられる多関節ロボットの制御に関し、特に、高い軌跡精度でウィービング動作を可能とする多関節ロボットの軌跡制御に関する。

背景技術

[0002] アーク溶接により複数の母材の溶接を行う際には、溶接電極を溶接方向に進ませつつ、溶接線の左右方向に正弦波ウィービング動作をさせながら溶接するウィービング溶接が採用される。このウィービング溶接は、従来から、溶接トーチ自体を左右に揺動させるか、または溶接トーチ自体を中心として左右に傾動させることにより行なわれている。このようなウィービング溶接を多関節ロボットに行わせる場合、高い軌跡精度が要求される。

[0003] このような多関節ロボットでは、各軸単位でサーボ制御が行われる。しかし、固有振動数が低いため、振動抑制の観点から、速度フィードフォワードなどはほとんど適用されない。したがって、目標値に対して実際のフィードバック値の位相遅れは大きく、サーボ制御部の速度制御部の応答特性が軸毎に異なり、軌跡誤差に繋がっていた。また、このような多関節ロボットの各軸を動作させるモータは、減速器を介してアームに結合されている。この減速器の剛性不足などに起因する弾性変形を補正する場合、モータが指令値どおりに動作することが前提となっている。しかしながら、フィードフォワードなどが十分機能していないため、モータが指令値どおりに動作することはほぼ不可能であり、弾性変形補償は十分に機能していなかった。このような多関節ロボットの弾性変形補償制御について、以下のような技術が公知である。

[0004] 日本国特開昭61-201304号公報（特許文献1）は、減速器等の関

節群の機械的な剛性が低い場合でも、位置指令値に対してロボットアームを高精度に位置制御する方法を開示する。この位置制御方法においては、ロボットを構成する各アームの位置指令値と、それを1階微分して得た速度と、2階微分して得た加速度と、を、各アーム間の関節の機械的剛性を考慮したロボットアームの運動方程式に代入することにより、各関節に加わるトルクが算出される。そして、求められたトルクを定数あるいは関数あるいは制御装置内のテーブルとして与えられた各関節の機械的ばね剛性で除することによって、各関節の機械的剛性に因るたわみ角が求められる。求められたたわみ角を、各関節のたわみを打ち消すように、位置指令値と和することにより、新たな位置指令値が設定される。

- [0005] また、日本国特開2005-186235号公報（特許文献2）は、干渉力が作用しても各軸が指令どおり動作するロボットの制御装置を開示する。この制御装置は、互いに干渉する複数軸から構成されるロボットの制御装置であって、ロボットは、モータと、モータに減速機等を介して結合されたアームと、モータの位置を検出するモータ位置検出器と、から構成された各軸を各軸毎の指令通りに動作させるための位置制御部および速度制御部を備える。この制御装置は、自軸の指令から他軸に作用する干渉力を計算で求める干渉力計算部と、他軸から作用する干渉力がある場合も自軸が指令どおり動作するようなモータトルク指令信号を、自軸の指令と他軸から作用する干渉力の計算値から求める非干渉トルク信号作成部と、を備える。制御装置はさらに、他軸から作用する干渉力がある場合も自軸が指令どおり動作するようなモータ位置信号を、自軸の指令と他軸から作用する干渉力の計算値から求める非干渉位置信号作成部を備える。

先行技術文献

特許文献

- [0006] 特許文献1：日本国特開昭61-201304号公報
特許文献2：日本国特開2005-186235号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0007] 上述した特許文献1では、減速器等の剛性不足から生じる撓み（弾性変形）を関節角目標値等から算出し、その弾性変形を補償するようにモータへの角度指令値に弾性変形量を加算することによって、位置精度の改善が図られている。しかしながら、上述のように良好なフィードフォワード制御などが行われていないので、モータは指令値どおりに動作せず、弾性変形補償は十分に機能していない。
- [0008] また、特許文献2では、各軸間の干渉を非干渉化する手法が開示されている。しかしながら、この手法では、アーム加速度の1階微分値、2階微分値が必要であり、非常にノイズに弱い。また少し急峻な動作があるだけでアーム加速度の2階微分値は天文学的な値を示すなど、実現する上で非常に制約が大きい。
- [0009] すなわち、従来技術では、以下のような問題が解決されていない。
- (1) ロボットの固有振動が低い状態で、弾性変形補償および軸力トルク補償を有効に作用させることができないため、弾性変形の影響を補償できないことが、精度劣化につながっている。
 - (2) サーボ制御部の位相遅れがある状態において、弾性変形補償制御を有効に作用させることができないため、弾性変形の影響を補償できないことが、精度劣化につながっている。
- [0010] (3) 軸毎にサーボ制御特性が異なるため、各軸の応答に差が発生することが、軌跡精度の劣化につながっている。
- (4) 指令値の計算周期がサーボ制御部における計算周期よりも遅い場合に発生する位相差が、軌跡精度の劣化につながっている。
 - (5) 溶接ロボットのウィービング動作では、ウィービング周期での位相遅れおよびゲイン特性を各軸そろえることが非常に重要であるが、減速器による弾性変形によるサーボ特性変化や軸毎での特性の差異によって、位相・ゲイン特性を高周波ウィービング動作でそろえることが非常に困難である。
- [0011] 本発明は、上述の問題に鑑みてなされたものであり、複数軸を備えた多関

節ロボットにおいて、各軸の弾性変形の影響を補償して高い軌跡精度でウィーピング等の動作を可能とすることができる、多関節ロボットの弾性変形補償制御装置および制御方法を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0012] 上記課題を解決するため、本発明に係る多関節ロボットの弾性変形補償制御装置は、以下の技術的手段を講じている。

即ち、本発明に係る多関節ロボットの弾性変形補償制御装置は、多関節ロボットの関節軸を駆動するモータとアームとが弾性変形する減速器を介して結合された多関節ロボットに取り付けられたツールに所望の動作を行わせるように複数の関節軸を駆動させる。この弾性変形補償制御装置は、所望のツール動作を実現するための各関節軸の関節角度指令値 θ_{lc} を算出して出力する関節角度指令値計算部と、前記関節角度指令値 θ_{lc} 通りに動作した際に発生する各関節軸に作用する軸力トルク f_c を、動力学モデルに基づいて関節角度指令値 θ_{lc} から算出して出力する軸力トルク計算部と、関節軸の剛性パラメータを含むパラメータに基づいて、関節角度指令値 θ_{lc} と軸力トルク f_c とからモータ角度指令値 θ_{mc} を算出して出力するモータ角度指令値計算部と、ロボットの固有振動周波数よりも低いカットオフ周波数を有する高周波遮断特性を備え、前記モータ角度指令値 θ_{mc} をフィルタリング処理して、処理後のモータ角度目標値 θ_{md} を出力する第1の動特性演算部と、前記モータ角度目標値 θ_{md} が前記モータに対する目標値として入力されるモータ角度制御部と、前記第1の動特性演算部よりも低いまたは同等のカットオフ周波数を有する高周波遮断特性を備え、前記軸力トルク計算部への入力および前記軸力トルク計算部からの出力の少なくともいずれかをフィルタリング処理して、処理後の軸力トルク補償値 f_d を出力する第2の動特性演算部と、前記モータ角度制御部から出力されるモータトルク指令値に、前記軸力トルク補償値 f_d が加算された値が目標値として入力されるモータ電流制御部と、を含んで構成されていることを特徴とする。

[0013] 弾性変形補償制御装置は、好ましくは、前記モータ角度制御部の応答が遅

い軸の第1の動特性演算部の位相遅れを、前記モータ角度制御部の応答が速い軸の第1の動特性演算部の位相遅れよりも短く与えるように構成することができる。

弾性変形補償制御装置は、さらに好ましくは、各軸間の軸力がない状態でのモータ角度目標値 θ_{md} から実際のモータ角度 θ_m までのフィードバック制御動特性を、位置フィードバックゲインおよび速度フィードバックゲインの少なくともいずれかを含むパラメータに基づいて算出するように構成され、前記第2の動特性演算部におけるカットオフ周波数を前記第1の動特性演算部におけるカットオフ周波数よりも低くするとともに、前記第2の動特性演算部における特性を前記フィードバック制御動特性で除した特性に対応するように、前記第1の動特性演算部の特性を与えるように構成することができる。

[0014] 弾性変形補償制御装置は、さらに好ましくは、前記モータ電流制御部の電流制御特性を考慮する場合、前記第2の動特性演算部における特性を前記フィードバック制御動特性で除すとともに、電流制御特性を乗じた特性に対応するように、前記第1の動特性演算部の特性を与えるように構成することができる。

弾性変形補償制御装置は、さらに好ましくは、前記モータ角度指令値計算部における計算周期が、前記モータ角度制御部における制御周期よりも遅い場合、前記モータ角度指令値計算部において、軸力トルク計算値または弾性変形量計算値と関節角度指令値との位相差を合わせ、位相補正後の軸力トルク計算値または弾性変形量計算値と位相補正後の関節角度指令値とから、モータ角度指令値を算出するように構成することができる。

[0015] また、本発明の別の形態に係る多関節ロボットの弾性変形補償制御方法は、所望のツール動作を実現するための各関節軸の関節角度指令値 θ_{lc} を算出して出力する関節角度指令値計算ステップと、前記関節角度指令値 θ_{lc} 通りに動作した際に発生する各関節軸に作用する軸力トルク f_c を、動力学モデルに基づいて関節角度指令値 θ_{lc} から算出して出力する軸力トルク計

算ステップと、関節軸の剛性パラメータを含むパラメータに基づいて、関節角度指令値 θ_{lc} と軸力トルク f_c とからモータ角度指令値 θ_{mc} を算出して出力するモータ角度指令値計算ステップと、ロボットの固有振動周波数よりも低いカットオフ周波数を有する高周波遮断特性を備え、前記モータ角度指令値 θ_{mc} をフィルタリング処理して、処理後のモータ角度目標値 θ_{md} を出力する第1の動特性演算ステップと、前記モータ角度目標値 θ_{md} が前記モータに対する目標値として入力されるモータ角度制御ステップと、前記第1の動特性演算ステップよりも低いまたは同等のカットオフ周波数を有する高周波遮断特性を備え、前記軸力トルク計算ステップへの入力および前記軸力トルク計算ステップからの出力の少なくともいずれかをフィルタリング処理して、処理後の軸力トルク補償値 f_d を出力する第2の動特性演算ステップと、前記モータ角度制御ステップから出力されるモータトルク指令値に、前記軸力トルク補償値 f_d が加算された値が目標値として入力されるモータ電流制御ステップと、を含んで構成されていることを特徴とする。

発明の効果

[0016] 本発明に係る弾性変形補償制御装置または制御方法を用いることにより、複数軸を備えた多関節ロボットにおいて、各軸の弾性変形の影響を補償して高い軌跡精度でウィービング等の動作を可能とすることができる。

図面の簡単な説明

[0017] [図1]本発明の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置が適用される多関節ロボットの全体構成を示す概略図である。

[図2]本発明の第1の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置の制御ブロック図である。

[図3]図2に示す制御ブロック図により制御された多関節ロボットのウィービング軌跡を示す図である。

[図4]従来技術に係る弾性変形補償制御装置の制御ブロック図である。

[図5]図4に示す制御ブロック図により制御された多関節ロボットのウィービング軌跡を示す図である。

[図6]従来技術に係る他の弾性変形補償制御装置の制御ブロック図である。

[図7]図6に示す制御ブロック図により制御された多関節ロボットのウィービング軌跡を示す図である。

[図8]本発明の第2の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置（図2の動特性とは異なる特性）により制御された多関節ロボットのウィービング軌跡を示す図である。

[図9]本発明の第2の実施の形態の変形例に係る弾性変形補償制御装置に係る制御ブロック図である。

[図10]本発明の第3の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置（図2の動特性とは異なる特性）により制御された多関節ロボットのウィービング軌跡を示す図である。

[図11]本発明の第4の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置（動特性を軸毎に変更）により制御された多関節ロボットのウィービング軌跡を示す図である。

[図12]本発明の第5の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置の制御ブロック図である。

[図13]本発明の第5の実施の形態の変形例に係る弾性変形補償制御装置の制御ブロック図である。

[図14]本発明の第6の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置の制御ブロック図である。

[図15]本発明の第6の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置の他の制御ブロック図である。

発明を実施するための形態

[0018] 以下、本発明の実施の形態に係る多関節ロボットの弾性変形補償制御装置および制御方法を、図面に基づき詳しく説明する。なお、以下の説明では、同一の部品は同一の符号を付され、それらの名称および機能も同じである。したがって、それらについての詳細な説明は繰り返さない。また、以下においては、制御対象として溶接トーチを傾動動作（ウィービング動作）させる

多関節ロボットを説明するが、これは一例に過ぎない。本発明に係る弾性変形補償制御装置は、多関節ロボットの関節軸を駆動するモータとアームとが弾性変形する減速器を介して結合された多関節ロボットに取り付けられたツールに所望の動作を行わせるように複数の関節軸を駆動するための制御に、広く適用が可能である。

[0019] <第1の実施の形態>

[全体構成]

まず、本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置が適用される垂直多関節ロボット（以下、単に多関節ロボットと記載する場合がある）の概要について説明する。

図1は、溶接トーチを傾動動作（ウィービング動作）させるロボットの一例であって、本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置が適用される多関節ロボット1の概要を示す図である。この多関節ロボット1は、垂直多関節型であってJ1～J6の6個の関節を備え、J6の軸の先端に設けられた溶接トーチから送りだされる溶接ワイヤによりアーク溶接を行う。この多関節ロボット1は、予め定められた溶接開始点と溶接終了点との間を溶接作業区間として設定し、溶接開始点と溶接終了点とを結ぶ溶接線方向に移動しつつ、溶接ワイヤを予め定められた振幅および周波数で傾動する動作（ウィービング動作）を行うようにセットされている。

[0020] このような多関節ロボット1は、図示した多関節ロボット1の本体に加えて、教示ペンダントを有し各軸をサーボ制御する制御装置（サーボ制御部）と、上位コンピュータ（上位CPU）と、を含む。これらの制御装置および上位コンピュータにより、本実施の形態に係る軌跡制御装置が実現されている。

制御装置（サーボ制御部）は、多関節ロボット1に設けられた溶接トーチを、予め教示したプログラムに従って、上述した溶接線に倣ってウィービング動作で移動するように制御する。教示プログラムは、制御装置に接続された教示ペンダントを使用して作成される場合や、上位コンピュータを利用し

たオフライン教示システムを使用して作成される場合がある。いずれの場合であっても、教示プログラムは、実際の動作の前に予め作成される。上位コンピュータでは、溶接パスが生成されたり、それに基づくウィービング動作指令が生成されたりする。

[0021] [制御ブロック]

図2は、図1の多関節ロボット1を制御する弾性変形補償制御装置10の制御ブロック図を示す。上述したように、この弾性変形補償制御装置10は、上位CPUで実現される部分とサーボ制御部で実現される部分とを含んで構成されている。

図2に示すように、この弾性変形補償制御装置10は、多関節ロボット1に取り付けられたツール（ここでは溶接トーチ）に所望の動作（ここではウィービング動作）を行わせるように、複数の関節軸を駆動する。

[0022] この弾性変形補償制御装置10は、上位CPUで実現される、関節角度指令値計算部100と、軸力トルク計算部（「軸力FF」として図示）200と、モータ角度指令値計算部（「弾性変形補償」として図示）600と、を備える。さらに、弾性変形補償制御装置10は、サーボ制御部で実現される、第1の動特性演算部（「動特性（1）」として図示）300と、第2の動特性演算部（「動特性（2）」として図示）400と、フィードバック制御部（「サーボ制御FB特性」として図示）500と、を備える。フィードバック制御部500は、モータ角度制御部510およびモータ電流制御部（「電流制御」として図示）520を含んで構成されている。なお、以下において、制御ブロックにおける要素の特性は、動特性との記載がない場合でも、全て動特性である。また、記載「FB」はフィードバックを意味し、記載「FF」はフィードフォワードを意味する。

[0023] 関節角度指令値計算部100は、溶接トーチのウィービング動作を実現するための各関節軸の関節角度指令値 θ_{ic} を算出して出力する。

軸力トルク計算部200は、関節角度指令値計算部100から出力された関節角度指令値 θ_{ic} 通りに動作した際に発生する各関節軸に作用する軸力

トルク f_c を、動力学モデルに基づいて関節角度指令値 θ_{lc} から算出し、出力する。

[0024] モータ角度指令値計算部 600 は、関節軸の剛性パラメータを含むパラメータに基づいて、関節角度指令値 θ_{lc} と軸力トルク f_c とからモータ角度指令値 θ_{mc} を算出し、出力する。

より詳しくは、軸力トルク計算部 200 が、関節角度指令値 θ_{lc} に基づいて指令値どおりに動作した際に各軸に作用する軸力トルク f_c を算出する。モータ角度指令値計算部 600 は、軸力トルク f_c から軸剛性 K や粘性 B などに基づいて（粘性は小さいため省略可能）弾性変形量 e_c を算出する。そして、モータ角度指令値計算部 600 は、関節角度指令値 θ_{lc} と弾性変形量 e_c とから、モータ角度指令値 θ_{mc} を算出する。

[0025] 第 1 の動特性演算部 300 は、モータ角度指令値計算部 600 から出力されたモータ角度指令値 θ_{mc} をフィルタリング処理して、処理後のモータ角度目標値 θ_{md} を出力する。この第 1 の動特性演算部 300 は、多関節ロボット 1 の固有振動周波数よりも低いカットオフ周波数を有する高周波遮断特性を備える。

第 2 の動特性演算部 400 は、軸力トルク計算部 200 への入力および軸力トルク計算部 200 からの出力の少なくともいずれかをフィルタリング処理して、処理後の軸力トルク補償値 f_d を出力する。なお、図 2 において、第 2 の動特性演算部 400 は、軸力トルク計算部 200 からの出力をフィルタリング処理している。この第 2 の動特性演算部 400 は、第 1 の動特性演算部 300 よりも低いまたは同等のカットオフ周波数を有する高周波遮断特性を備える。

[0026] モータ角度制御部 510 には、モータに対する目標値として、モータ角度目標値 θ_{md} が入力される。

モータ電流制御部 520 には、モータ角度制御部 510 から出力されるモータトルク指令値に、第 2 の動特性演算部 400 から出力された軸力トルク補償値 f_d が加算された値が、目標値として入力される。

[0027] 図2に示すブロック図で示される弾性変形補償制御装置10は、以下のよう
な特徴を備える。

非線形項である軸力トルク計算部200の前および／または後（ここでは
後のみ）に、第2の動特性演算部400が配置されている。この第2の動特
性演算部400により、第1の動特性演算部300の高周波遮断特性以上の
高周波帯域を遮断する特性が与えられている。ここで、第2の動特性演算部
400のカットオフ周波数は、第1の動特性演算部300のカットオフ周波
数よりも低いか同等である。

[0028] このように構成することにより、第1の動特性演算部300により、関節
角度指令値 θ_{1c} に含まれる固有振動成分を含む高周波を抑制することがで
きる。さらに、第2の動特性演算部400により、軸力トルク f_c に含まれ
る固有振動成分を含む高周波を抑制することができる。これにより、多関節
ロボット1に発生する高周波振動を抑制することができる。

[0029] また、多関節ロボット1では、XYZ空間で低周波動作をさせても特異点
近傍などのヤコビアン（Jacobian）が急峻に変化するところにおいて、関節
角度に変化すると2倍や3倍成分の高周波が発生する。さらに、関節角度空
間にて低周波動作をさせても、非線形項は速度の2乗項などを有しているた
め、関節角度の2倍や3倍成分の高周波が発生する。このため、非線形項で
ある軸力トルク計算部200からの出力である軸力トルク f_c を、第1の動
特性演算部300の高周波遮断特性以上の高周波遮断特性を備えた第2の動
特性演算部400で処理して軸力トルク補償値 f_d とする。これにより、多
関節ロボット1に発生する高周波振動をさらに抑制している。

[0030] [制御特性（ウィービング軌跡）]

以上のような構成を備えた弾性変形補償制御装置10を用いて多関節ロボ
ット1を制御した場合の制御特性（ウィービング軌跡）について説明する。

図3は、第2の動特性演算部400の高周波遮断特性として、第1の動特
性演算部300と同等の高周波遮断特性を与えた場合のウィービング軌跡を
示す。

[0031] これを評価するにあたり、まず従来技術（制御ブロック図およびウィーピング軌跡）について説明する。

図4は、最も一般的な多関節ロボットの制御ブロック図を示す。図4に示すように、この制御ブロックは、位置制御部（ G_p ）と速度制御部（ G_v ）と電流制御部とから構成される。位置制御部は、関節角度をフィードバック制御し、角度偏差を比例制御（P制御）し、速度指令として速度制御部に指令する。速度制御部は、関節角速度をフィードバック制御し、与えられた速度指令との偏差を比例積分制御（PI制御）し、電流制御指令として電流制御部に指令する。電流制御部は、与えられた電流制御指令に基づきモータ電流を制御する。

[0032] なお、多関節ロボットは、機械の固有振動数が低いため、目標値に固有振動を励起する成分が含まれないように、図4に示す第1の動特性演算部（動特性1）などでのフィルタ処理にて、それらの成分を抑制している。

ただし、多関節ロボットでは各軸間で干渉トルクが、重力項などを含めて非線形項 c として各リンクに作用する。バネ要素として作用する減速器を介してリンクとモータとが結合されているため、軸力がリンクとモータとに作用・反作用として作用する。特に溶接ロボットのウィーピング動作では、上下にぶれることなく（上下方向の動きを発生させることなく）所望方向に所望の振幅で溶接トーチを揺動させることが必要であるために、非常に高精度な動的制御が必要とされる。そのため、この軸力および弾性変形の影響は甚大である。

[0033] 図5は、図4の制御ブロックで示される制御装置で多関節ロボットを制御した場合のウィーピング軌跡を示す。この図5に示すように、非線形項、軸力および弾性変形が作用すると上下方向の動きが発生してしまい、ウィーピング動作として全くふさわしくない。これを抑制するためには、目標値ベースで軸力を算出し、フィードフォワード補償することが考えられる。

[0034] 図6は、このような考えに基づいた目標値ベースの、従来技術に係る非線形フィードフォワード補償を実現する制御ブロック図を示す。

図7は、図6の制御ブロックで示される制御装置で多関節ロボットを制御した場合のウィービング軌跡を示す。これは目標値ベースのフィードフォワード補償であるため、位相遅れの影響によりフィードフォワードタイミングがずれてしまい、却って、上下方向の動きを悪化させる結果となっている。

[0035] 一般に、このような従来技術に係る制御では、フィードバック制御部（サーボ制御フィードバック特性）における位相特性やゲイン特性が各軸毎に異なるため、フィードフォワード制御などの位相を合わせることが困難であった。このため、上記のような軸力トルク補償や弾性変形補償はほとんど実用化されておらず、弾性変形などの影響を抑制することは困難となっていた。

[0036] なお、図6では、上位CPUが、非線形フィードフォワード計算を行っている。非線形項の計算が非常に複雑で計算量が多く、サーボ制御部で計算することが難しいため、上位CPUにより目標値ベースでおこなわれるのが一般的である。

このような従来技術に係る制御による結果（ウィービング軌跡）を示す図5および図7と比較すると、本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置10による結果（ウィービング軌跡）は、図3に示すように、上下動成分は発生しているものの格段に上下動成分が抑制されている。なお、図3は、第2の動特性演算部400における高周波遮断特性を、第1の動特性演算部300における高周波遮断特性と同等とした場合の結果である。

[0037] 本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置10においては、第1の動特性演算部300により、関節角度指令値 θ_{lc} に含まれる固有振動成分を含む高周波が抑制される。さらに、第2の動特性演算部400により、軸力トルク f_c に含まれる固有振動成分を含む高周波が抑制される。このことにより、上述した従来技術における非線形項に起因する振動が抑制される。

[0038] 以上のようにして、本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置によると、多関節ロボットにおいて、各軸の弾性変形の影響を補償して高い軌跡精度でウィービング等の動作を可能とすることができる。

[0039] <第2の実施の形態>

以下、本発明の第2の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置について説明する。なお、本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置は、上述した第1の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置10と、第1の動特性演算部300の与え方において異なる。それ以外は、第1の実施の形態と同じであるので、上述した説明と重複する部分についてはここでは繰り返さない。

[0040] 上述した第1の実施の形態においては、第1の動特性演算部300と同等以上の高周波遮断特性が第2の動特性演算部400に与えられていた。本実施の形態においては、第2の動特性演算部400が、第1の実施の形態と同じように非常に強い高周波遮断特性を備えるように与えられる。また、第1の動特性演算部300が、第2の動特性演算部400の動特性に各軸サーボ制御にて想定されるフィードバック特性の逆特性を乗じたものとして与えられる。これは、第2の動特性演算部400における特性をフィードバック制御動特性で除した特性に対応するように、第1の動特性演算部300の特性を与えるように構成されていることを示す。

[0041] 図2に示す制御ブロックの場合、各軸サーボフィードバック制御の動特性は、以下の式(1)で与えられる。なお、以下に示す式においては、「動特性1」は、第1の動特性演算部300における動的特性を示し、「動特性2」は、第2の動特性演算部400における動的特性を示している。

[0042] [数1]

$$\frac{\text{電流制御特性} \times (G_p \cdot G_v \cdot s + G_p \cdot G_i)}{J_m \cdot s^3 + \text{電流制御特性} \times (G_v \cdot s^2 + (G_p \cdot G_v + G_i) \cdot s + G_p \cdot G_i)} \quad (1)$$

[0043] したがって、第1の動特性演算部300は、以下の式(2)で与えられる。

[0044] [数2]

$$\begin{aligned} & \text{動特性2} / \text{サーボFB制御動特性} \times \text{電流制御特性} = \\ & \text{動特性2} \times \frac{J_m \cdot s^3 + \text{電流制御特性} \times (G_v \cdot s^2 + (G_p \cdot G_v + G_i) \cdot s + G_p \cdot G_i)}{G_p \cdot G_v \cdot s + G_p \cdot G_i} \quad (2) \end{aligned}$$

[0045] ただし、式(2)がプロパー(proper)な伝達関数(分子多項式の次数が分母多項式のそれに比べて等しいかまたは低い)となるように、第2の動特性演算部400には強い高周波遮断特性を与える必要がある。

このようにして、第1の動特性演算部300および第2の動特性演算部400を与えた場合のウィービング軌跡を図8に示す。図8に示すように、本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置によるウィービング軌跡では、第1の実施の形態におけるウィービング軌跡(図3)よりも、さらに上下方向の振動が抑制されていることがわかる。

[0046] 以上のようにして、本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置は、多関節ロボットにおいて、各軸の弾性変形の影響を補償して、さらに高い軌跡精度でウィービング等の動作を可能とすることができる。

[0047] <第2の実施の形態の変形例>

次に、第2の実施の形態の変形例に係る弾性変形補償制御装置について説明する。

[0048] 上述したように、第2の動特性演算部400の特性は、所望の動特性(非常に強い高周波遮断特性と備える)として与えられていた。しかしながら、モータ電流制御部520の電流制御特性を無視できない場合には、所望の動特性を電流制御特性で除した特性として、第2の動特性演算部400の特性が与えられる。これは、モータ電流制御部520の電流制御特性を考慮する場合、第2の動特性演算部400における特性をフィードバック制御動特性で除すとともに、電流制御特性を乗じた特性に対応するように、第1の動特性演算部300の特性を与えるように構成されていることを示す。

[0049] この場合、第2の動特性演算部400の特性は、以下の式(3)で与えられる。

[0050] [数3]

$$\text{動特性}2 = \text{所望の動特性} / \text{電流制御特性} \quad (3)$$

[0051] このため、上述した式(2)で表された第1の動特性演算部300の特性

は、以下の式（４）で与えられる。

[0052] [数4]

$$\begin{aligned} & \text{動特性 2 / サーボ F B 制御動特性} \times \text{電流制御特性} = \\ & \text{所望動特性} \times \frac{J_m \cdot s^3 + \text{電流制御特性} \times (G_v \cdot s^2 + (G_p \cdot G_v + G_i) \cdot s + G_p \cdot G_i)}{\text{電流制御特性} \times (G_p \cdot G_v \cdot s + G_p \cdot G_i)} \quad (4) \end{aligned}$$

[0053] 図9は、上述のようにして、第1の動特性演算部300および第2の動特性演算部400を与える場合の制御ブロック図を示す。図9に示すように、この弾性変形補償制御装置20における第2の動特性演算部2400の特性は、所望の動特性2410に電流制御特性の逆特性2420を乗じたものとなっている。

以上のようにして、本変形例に係る弾性変形補償制御装置は、多関節ロボットにおいて、モータ電流制御部520の電流制御特性を考慮して、各軸の弾性変形の影響を補償して、さらに高い軌跡精度でウィービング等の動作を可能とすることができる。

[0054] <第3の実施の形態>

以下、本発明の第3の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置について説明する。なお、本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置は、上述した第1の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置10と、第1の動特性演算部300の与え方において異なる。それ以外は、第1の実施の形態と同じであるので、上述した説明と重複する部分についてはここでは繰り返さない。

[0055] 電流制御特性は、非常に高速応答のため1として近似しても良い性能が得られることを考慮すると、式（1）は、以下の式（5）に変形される。

[0056] [数5]

$$\frac{G_p \cdot G_v \cdot s + G_p \cdot G_i}{J_m \cdot s^3 + G_v \cdot s^2 + (G_p \cdot G_v + G_i) \cdot s + G_p \cdot G_i} \quad (5)$$

[0057] そして、第1の動特性演算部300を与える式（2）は、以下の式（6）に変形される。

[0058]

[数6]

$$\begin{aligned} & \text{動特性 2 / サーボ F B 制御動特性} = \\ & \text{動特性 2} \times \frac{J_m \cdot s^3 + Gv \cdot s^2 + (Gp \cdot Gv + Gi) \cdot s + Gp \cdot Gi}{Gp \cdot Gv \cdot s + Gp \cdot Gi} \end{aligned} \quad (6)$$

[0059] これは、第2の動特性演算部400におけるカットオフ周波数を第1の動特性演算部300におけるカットオフ周波数よりも低くするとともに、第2の動特性演算部400における特性をフィードバック制御動特性（サーボFB制御動特性）で除した特性に対応するように、第1の動特性演算部300の特性を与えるように構成されていることを示す。

なお、この場合、各軸間の軸力がない状態でのモータ角度目標値 θ_{md} から実際のモータ角度 θ_m までのフィードバック制御動特性を、位置フィードバックゲインおよび速度フィードバックゲインの少なくともいずれかを含むパラメータに基づいて算出するように構成されている。

[0060] 図10は、このようにして、第1の動特性演算部300および第2の動特性演算部400を与えた場合のウィービング軌跡を示す。図10に示すように、本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置においては、電流制御特性を1で近似しているため、当然ながら第2の実施の形態におけるウィービング軌跡（図8）の性能には及ばない。しかしながら、従来技術に比べて良好な、実用に十分耐え得る性能を発揮していることがわかる。このように電流制御特性を1で近似することにより、実用に十分耐え得る性能を満足しつつ、演算時間を短縮することができる。

[0061] <第4の実施の形態>

以下、本発明の第4の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置について説明する。なお、本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置は、上述した第1の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置10と、第1の動特性演算部300の与え方において異なる。それ以外は、第1の実施の形態と同じであるので、上述した説明と重複する部分についてはここでは繰り返さない。

[0062] 本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置は、モータ角度制御部510の

応答が遅い軸の第1の動特性演算部300の位相遅れを、モータ角度制御部510の応答が速い軸の第1の動特性演算部300の位相遅れよりも短く与えるように構成されている。

上述した第2および第3の実施の形態においては、各軸毎に所望の動特性が与えられていたが、実際のウィービング動作では各軸の動特性を揃える必要がある。このためには、全軸で同じ（共通の）所望の動特性が与えられればよい。上述した図8および図10は、既に全軸で同じ所望の動特性が与えられている。

[0063] 図11は、所望の動特性を軸毎に少し変更したときのウィービング軌跡を示す。図11に示すように、軸毎に動特性を変更させることにより、各軸の応答を異ならせると、上下動が発生することがわかる。すなわち、上述した第1～第3の実施の形態（および従来技術）の結果は、各軸の応答をそろえた結果であり、各軸の応答を揃えない場合、ウィービング精度は悪化する。

[0064] また、第1～第3の実施の形態においては、所望の動特性が全軸について同じである。式(1)および式(2)から明らかなように、サーボFB制御動特性の逆特性を「動特性1」に乗じているため、サーボFB制御動特性が遅い軸では、速い軸に比べて、「動特性1」の応答が速くなる。また、サーボFB制御動特性が速い軸では、遅い軸に比べて、「動特性1」の応答が遅くなる。

[0065] 式(1)および式(2)により「動特性1」を与えることが一番良い方法であるが、関節角度指令値 θ_{lc} から関節角度 θ までの位相特性やゲイン特性は軸毎に異なる。本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置は、サーボFB制御動特性の遅い軸に比べて速い軸の「動特性1」を遅くすることにより、図11の状態から、全軸で同じ動特性を「動特性1」として与えた図3、図8または図9の状態に徐々に近づけることができる。

[0066] <第5の実施の形態>

以下、本発明の第5の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置について説明する。なお、本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置は、上述した第1

の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置 10 が備えなかった速度フィードフォワード制御および／または加速度フィードフォワード制御が加えられている点において異なる。それ以外は、第 1 の実施の形態と同じであるので、上述した説明と重複する部分についてはここでは繰り返さない。

[0067] 上述した実施の形態においては、速度フィードフォワード制御および／または加速度フィードフォワード制御を備えていなかった。しかしながら、本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置 30 は、速度フィードフォワード制御および加速度フィードフォワード制御を備える。

図 12 は、第 5 の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置 30 のブロック図を示す。弾性変形補償制御装置 30 は、速度フィードフォワード制御および加速度フィードフォワード制御を備える。

[0068] 図 12 に示すように、弾性変形補償制御装置 30 は、モータ角度制御部 510 に代えて、モータ角度制御部 3510 を備える。

この図 12 に示す弾性変形補償制御装置 30 では、式 (1) は、以下の式 (7) で与えられる。

[0069] [数7]

$$\frac{\text{電流制御特性} \times (Gda \cdot Jd \cdot s^3 + Gdv \cdot Gv \cdot s^2 + (Gp \cdot Gv + Gdv \cdot Gi) \cdot s + Gp \cdot Gi)}{Jm \cdot s^3 + \text{電流制御特性} \times (Gv \cdot s^2 + (Gp \cdot Gv + Gi) \cdot s + Gp \cdot Gi)} \quad (7)$$

[0070] この式 (7) に基づいて、式 (2)、式 (4) および式 (6) を用いて「動特性 1」を算出すればよい。電流制御特性を無視して「ゲイン = 1」としても、従来技術よりも良い性能が得られる。

なお、ここで、Gda および Gdv は、加速度フィードフォワードおよび速度フィードフォワードゲインであり、0 ~ 1 の値をとる。また、Jd は Jm の予測値である。

[0071] また、上述したように、電流制御特性も、電流制御ゲインおよびモータパラメータ（インダクタンスや抵抗）から算出可能である。

以上のようにして、本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置によると、

速度フィードフォワード制御および加速度フィードフォワード制御を加えて、各軸の弾性変形の影響を補償して、高い軌跡精度でウィービング等の動作を可能とすることができる。

[0072] <第5の実施の形態の変形例>

次に、第5の実施の形態の変形例に係る弾性変形補償制御装置について説明する。

図13に示すように、本変形例では、非線形項である軸力トルク計算部200の前後に、第2の動特性演算部4400が配置される。より詳しくは、軸力トルク計算部200の前に動特性(21)4410が配置され、軸力トルク計算部200の後に動特性(22)4420が配置される。

[0073] ここで、動特性(21)×動特性(22)が上述した動特性(2)と一致するように与えられれば、これまでの実施の形態と同等の効果が得られる。ここで、 $\theta | e$ は関節角度指令値 $\theta | c$ を動特性(21)4410に入力したときの出力値である。この $\theta | e$ に基づいて軸力トルク計算部200にて算出された軸力トルク $f | c$ を動特性(22)4420に入力したときの出力値が、軸力トルク補償値 $f | d$ である。

[0074] 以上のようにして、本変形例に係る弾性変形補償制御装置によると、多関節ロボットにおいて、分割して配置された第2の動特性演算部により、各軸の弾性変形の影響を補償して、高い軌跡精度でウィービング等の動作を可能とすることができる。

[0075] <第6の実施の形態>

以下、本発明の第6の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置について説明する。

[0076] 図14および図15は、本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置の制御ブロック図を示す。図14に示す制御ブロックと、図15に示す制御ブロックとは、逆変換(逆ヤコビ)要素の数および位置において異なる。

本実施の形態においては、「動特性2」(または「所望動特性」)によって目標値から実値への動特性が決定されるため、与えられた「動特性2」に

したがって、ウィービング動作時の周期におけるゲイン特性および位相特性を逆算することが可能となる。その特性に応じてウィービング指令を補正することにより、所望のウィービング動作を実現することができるようになる。

[0077] <第7の実施の形態>

以下、本発明の第7の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置について説明する。なお、本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置は、上述した第1の実施の形態に係る弾性変形補償制御装置10とは、軸力トルク計算値または弾性変形量計算値と関節角度指令値との位相差を合わせる点において異なる。それ以外は、第1の実施の形態と同じであるので、上述した説明と重複する部分についてはここでは繰り返さない。

[0078] 本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置においては、モータ角度指令値計算部における計算周期が、モータ角度制御部における制御周期よりも遅い場合には、以下のように処理する。モータ角度指令値計算部600において、軸力トルク計算値または弾性変形量計算値と関節角度指令値との位相差を合わせ、位相補正後の軸力トルク計算値または弾性変形量計算値と位相補正後の関節角度指令値とから、モータ角度指令値が算出される。

[0079] 本実施の形態に係る弾性変形補償制御装置について、以下に詳しく説明する。軸力を算出する際、関節角度の速度および加速度が必要となるが、通常、これらには差分処理により算出された速度および加速度が用いられる。軸力を算出する軸力トルク計算部200では、サーボ制御周期よりも非常に遅い周期dTで処理が行われるため、差分による位相遅れの影響も非常に大きく、それらの位相を揃えるために位相補正が行なわれる。

[0080] たとえば、加速度を以下の式(8)により導出した際には、速度を以下の式(9)により導出することにより、位相を揃えることが可能になる。

[0081] [数8]

$$\ddot{\theta}_c(k) = (\theta_{ic}(k) - 2\theta_{ic}(k-1) + \theta_{ic}(k-2)) / dT^2 \quad (8)$$

[0082] [数9]

$$\dot{\theta}_c(k) = (\theta_{ic}(k) - \theta_{ic}(k-1)) / dT \quad \text{ではなく} \quad \dot{\theta}_c(k) = (\theta_{ic}(k) - \theta_{ic}(k-2)) / 2dT \quad (9)$$

[0083] また、位置は、以下の式(10)または式(11)で与えれば良い。

[0084] [数10]

$$\theta_c(k) = (\theta_{ic}(k) + 2\theta_{ic}(k-1) + \theta_{ic}(k-2)) / 4 \quad (10)$$

[0085] [数11]

$$\theta_c(k) = \theta_{ic}(k-1) \quad (11)$$

[0086] このように、位相を合わせた関節角度指令値 θ_{ic} を用いて弾性変形量 e_c を算出し、さらにモータ指令値を算出する際は位相を合わせた関節角度指令値 θ_{ic} に対して弾性変形量 e_c で補正し、モータ角度指令値 θ_{mc} を算出すればよい。

[0087] <各実施の形態の作用効果>

上述した第1～第7の実施の形態のように、すなわち以下のように構成した弾性変形補償制御装置は、弾性変形する減速器を介してモータとアームとが結合された多関節ロボットにおいて、高い軌跡精度でウィービング等の動作を可能とすることができる。

[0088] (1) 目標値から固有振動周期を遮断するローパスフィルタ特性を与え、振動成分を目標角度から除去するとともに、軸力トルクについてもローパスフィルタ処理する。これにより、目標値と軸力トルクの位相を揃え、振動抑制しつつ弾性変形補償を行う。

(2) サーボ制御部の位相遅れがある状態においても、軸力トルク補償に関するローパスフィルタの特性を遅らせる事で、目標値と軸力補償トルクの位相を揃え、振動抑制しつつ弾性変形補償を行う。

[0089] (3) 軸毎のサーボ制御特性の違いを、上記ローパスフィルタにて吸収することにより、軸毎の特性差を揃える。

(4) モータ角度指令値計算部における計算周期が、モータ角度制御部における制御周期よりも遅い場合には、モータ角度指令値計算部において、軸力トルク計算値または弾性変形量計算値と関節角度指令値との位相差を合わせる。

[0090] (5) 上述した対応の上、ウィービング周期毎にウィービング振幅補正を行う。

[0091] なお、今回開示された実施の形態はすべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は上記した説明ではなくて特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。本出願は2012年5月30日出願の日本特許出願（特願2012-123239）に基づくものであり、その内容はここに参照として取り込まれる。

符号の説明

[0092] 1 多関節ロボット

10、20、30、40 弾性変形補償制御装置

100 関節角度指令値計算部

200 軸力トルク計算部（軸力FF）

300 第1の動特性演算部（動特性（1））

400、2400、4400 第2の動特性演算部（動特性（2））

500 フィードバック制御部（サーボ制御FB特性）

600 モータ角度指令値計算部（弾性変形補償）

510 モータ角度制御部

520 モータ電流制御部（電流制御）

請求の範囲

[請求項1]

弾性変形する減速器を介してモータとアームとが結合された多関節ロボットに取り付けられたツールに所望の動作を行わせるように複数の関節軸を前記モータにより駆動する多関節ロボットの弾性変形補償制御装置であって、

前記ツールの所望の動作を実現するための各関節軸の関節角度指令値 θ_{lc} を算出して出力する関節角度指令値計算部と、

前記関節角度指令値 θ_{lc} 通りに動作した際に発生する各関節軸に作用する軸力トルク f_c を、動力学モデルに基づいて関節角度指令値 θ_{lc} から算出して出力する軸力トルク計算部と、

前記関節軸の剛性パラメータを含むパラメータに基づいて、関節角度指令値 θ_{lc} と軸力トルク f_c とからモータ角度指令値 θ_{mc} を算出して出力するモータ角度指令値計算部と、

前記多関節ロボットの固有振動周波数よりも低いカットオフ周波数を有する高周波遮断特性を備え、前記モータ角度指令値 θ_{mc} をフィルタリング処理して、処理後のモータ角度目標値 θ_{md} を出力する第1の動特性演算部と、

前記モータ角度目標値 θ_{md} が前記モータに対する目標値として入力されるモータ角度制御部と、

前記第1の動特性演算部よりも低いまたは同等のカットオフ周波数を有する高周波遮断特性を備え、前記軸力トルク計算部への入力および前記軸力トルク計算部からの出力の少なくともいずれかをフィルタリング処理して、処理後の軸力トルク補償値 f_d を出力する第2の動特性演算部と、

前記モータ角度制御部から出力されるモータトルク指令値に、前記軸力トルク補償値 f_d が加算された値が目標値として入力されるモータ電流制御部と、

を含んで構成されていることを特徴とする多関節ロボットの弾性変

形補償制御装置。

[請求項2] 前記モータ角度制御部の応答が遅い軸の第1の動特性演算部の位相遅れを、前記モータ角度制御部の応答が速い軸の第1の動特性演算部の位相遅れよりも短く与えるように構成されていることを特徴とする、請求項1に記載の多関節ロボットの弾性変形補償制御装置。

[請求項3] 各軸間の軸力がない状態でのモータ角度目標値 θ_{md} から実際のモータ角度 θ_m までのフィードバック制御動特性を、位置フィードバックゲインおよび速度フィードバックゲインの少なくともいずれかを含むパラメータに基づいて算出するように構成され、

前記第2の動特性演算部におけるカットオフ周波数を前記第1の動特性演算部におけるカットオフ周波数よりも低くするとともに、前記第2の動特性演算部における特性を前記フィードバック制御動特性で除した特性に対応するように、前記第1の動特性演算部の特性を与えるように構成されていることを特徴とする、請求項1に記載の多関節ロボットの弾性変形補償制御装置。

[請求項4] 各軸間の軸力がない状態でのモータ角度目標値 θ_{md} から実際のモータ角度 θ_m までのフィードバック制御動特性を、位置フィードバックゲインおよび速度フィードバックゲインの少なくともいずれかを含むパラメータに基づいて算出するように構成され、

前記第2の動特性演算部におけるカットオフ周波数を前記第1の動特性演算部におけるカットオフ周波数よりも低くするとともに、前記第2の動特性演算部における特性を前記フィードバック制御動特性で除した特性に対応するように、前記第1の動特性演算部の特性を与えるように構成されていることを特徴とする、請求項2に記載の多関節ロボットの弾性変形補償制御装置。

[請求項5] 前記モータ電流制御部の電流制御特性を考慮する場合、前記第2の動特性演算部における特性を前記フィードバック制御動特性で除すとともに、電流制御特性を乗じた特性に対応するように、前記第1の動

特性演算部の特性を与えるように構成されていることを特徴とする、請求項3に記載の多関節ロボットの弾性変形補償制御装置。

[請求項6] 前記モータ電流制御部の電流制御特性を考慮する場合、前記第2の動特性演算部における特性を前記フィードバック制御動特性で除すとともに、電流制御特性を乗じた特性に対応するように、前記第1の動特性演算部の特性を与えるように構成されていることを特徴とする、請求項4に記載の多関節ロボットの弾性変形補償制御装置。

[請求項7] 前記モータ角度指令値計算部における計算周期が、前記モータ角度制御部における制御周期よりも遅い場合、

前記モータ角度指令値計算部において、軸力トルク計算値または弾性変形量計算値と関節角度指令値との位相差を合わせ、位相補正後の軸力トルク計算値または弾性変形量計算値と位相補正後の関節角度指令値とから、モータ角度指令値を算出するように構成されていることを特徴とする、請求項1～請求項6のいずれか1項に記載の多関節ロボットの弾性変形補償制御装置。

[請求項8] 弾性変形する減速器を介してモータとアームとが結合された多関節ロボットに取り付けられたツールに所望の動作を行わせるように複数の関節軸を前記モータにより駆動する多関節ロボットの弾性変形補償制御方法であって、

前記ツールの所望の動作を実現するための各関節軸の関節角度指令値 θ_{lc} を算出して出力する関節角度指令値計算ステップと、

前記関節角度指令値 θ_{lc} 通りに動作した際に発生する各関節軸に作用する軸力トルク f_c を、動力学モデルに基づいて関節角度指令値 θ_{lc} から算出して出力する軸力トルク計算ステップと、

前記関節軸の剛性パラメータを含むパラメータに基づいて、関節角度指令値 θ_{lc} と軸力トルク f_c とからモータ角度指令値 θ_{mc} を算出して出力するモータ角度指令値計算ステップと、

前記多関節ロボットの固有振動周波数よりも低いカットオフ周波数

を有する高周波遮断特性を備え、前記モータ角度指令値 θ_{mc} をフィルタリング処理して、処理後のモータ角度目標値 θ_{md} を出力する第1の動特性演算ステップと、

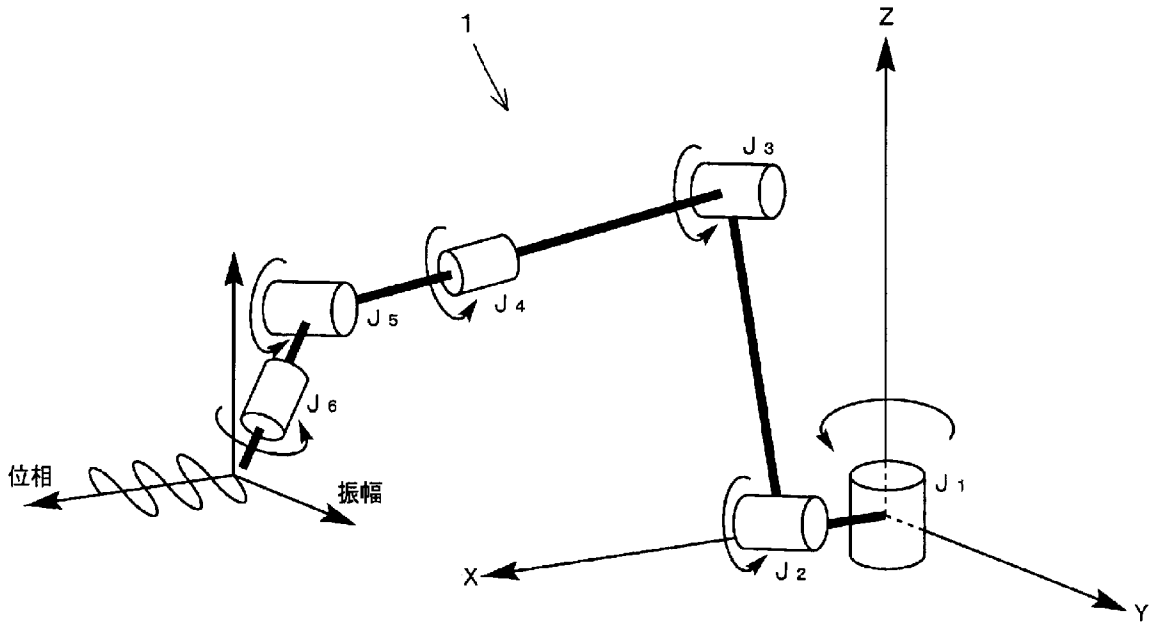
前記モータ角度目標値 θ_{md} が前記モータに対する目標値として入力されるモータ角度制御ステップと、

前記第1の動特性演算ステップよりも低いまたは同等のカットオフ周波数を有する高周波遮断特性を備え、前記軸力トルク計算ステップへの入力および前記軸力トルク計算ステップからの出力の少なくともいずれかをフィルタリング処理して、処理後の軸力トルク補償値 f_d を出力する第2の動特性演算ステップと、

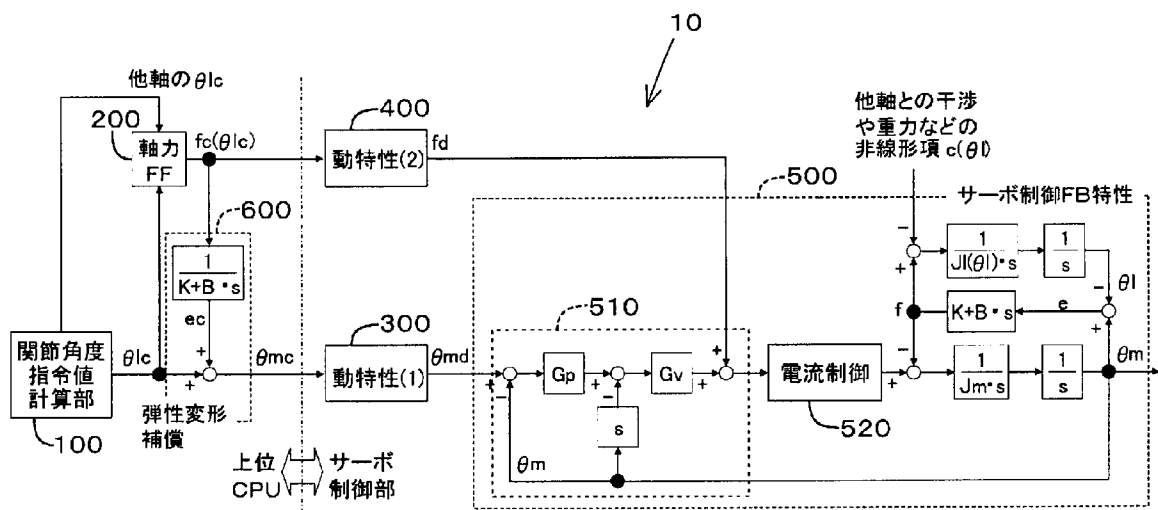
前記モータ角度制御ステップから出力されるモータトルク指令値に、前記軸力トルク補償値 f_d が加算された値が目標値として入力されるモータ電流制御ステップと、

を含んで構成されていることを特徴とする多関節ロボットの弾性変形補償制御方法。

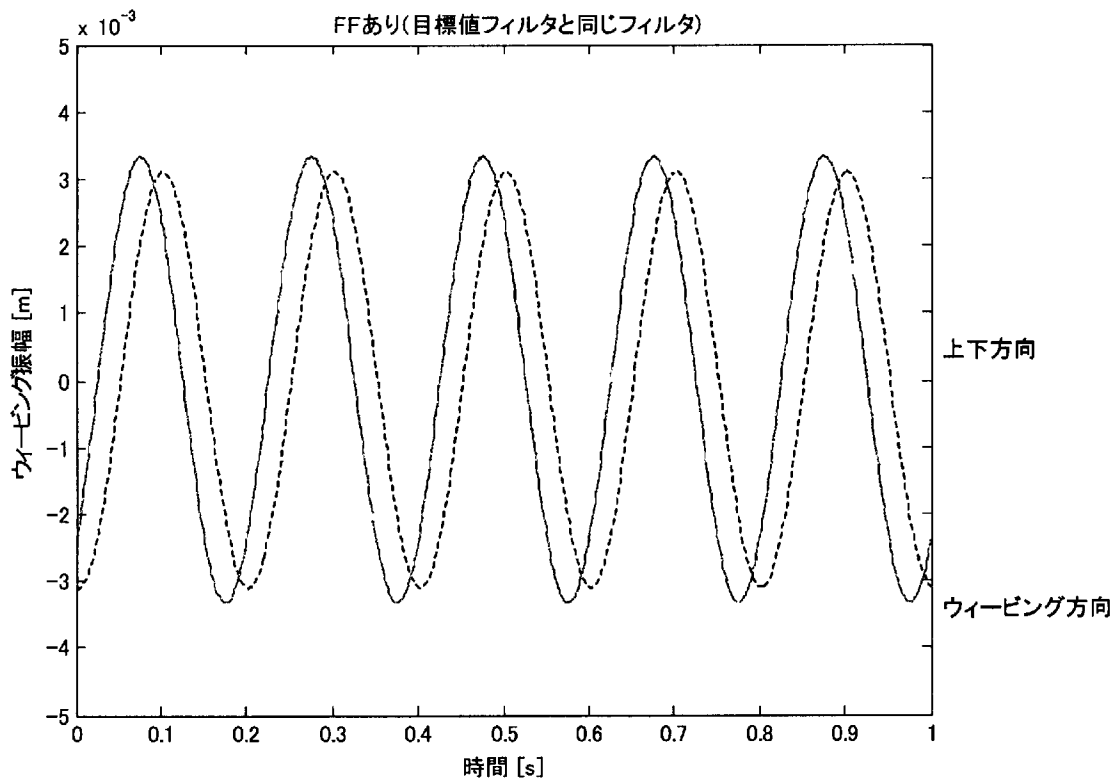
[図1]



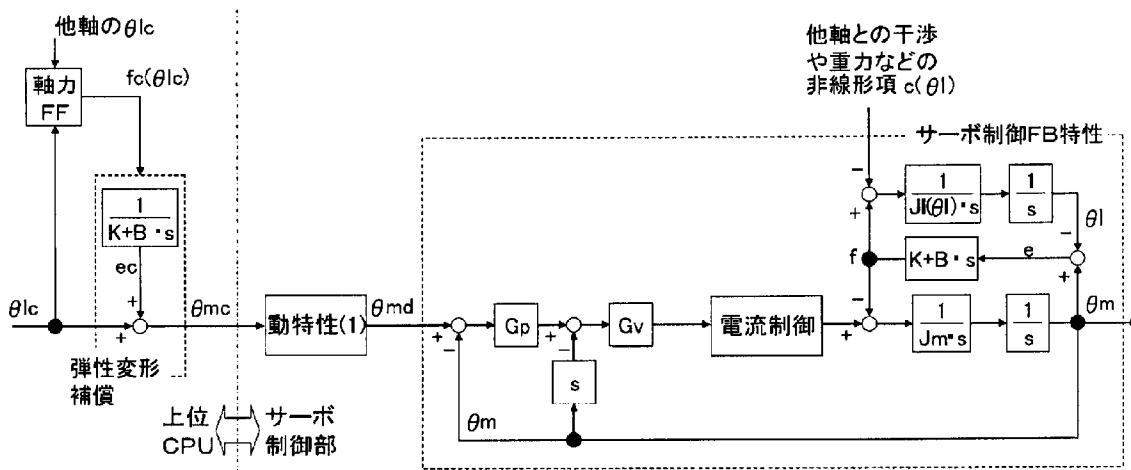
[図2]



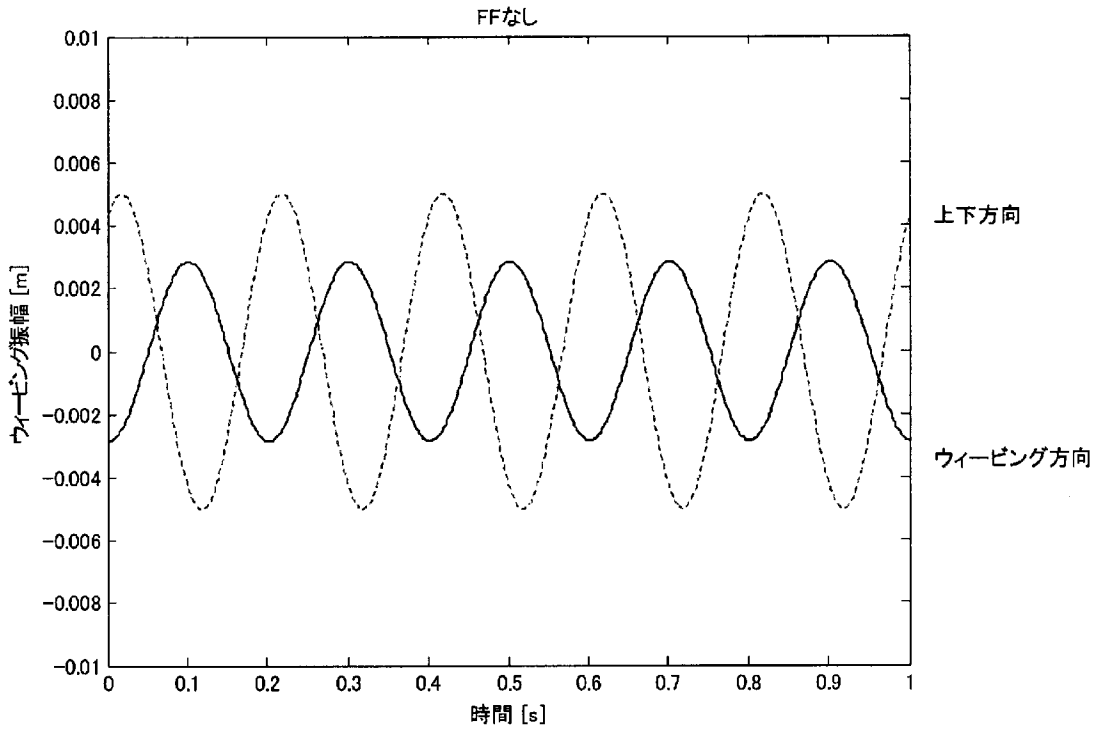
[図3]



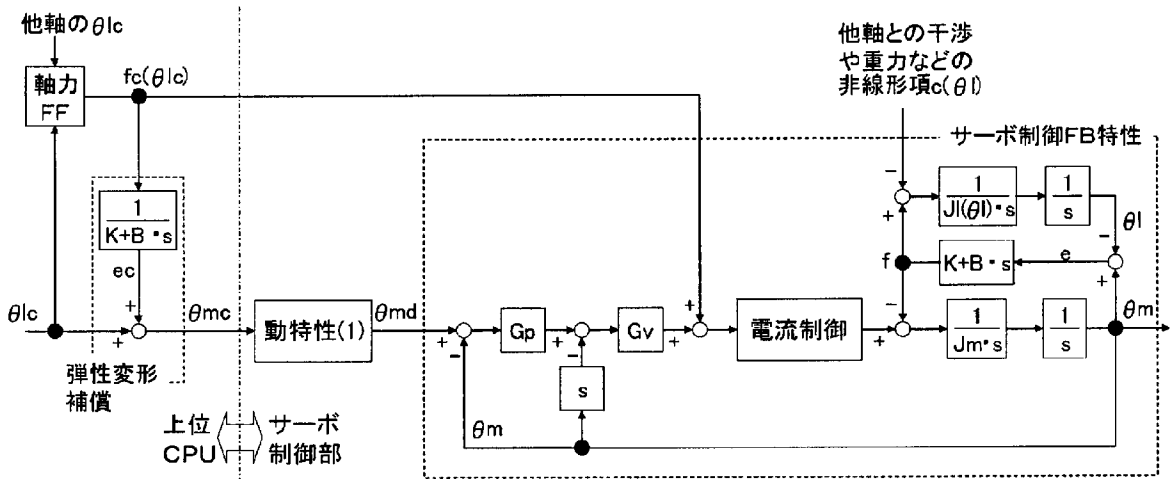
[図4]



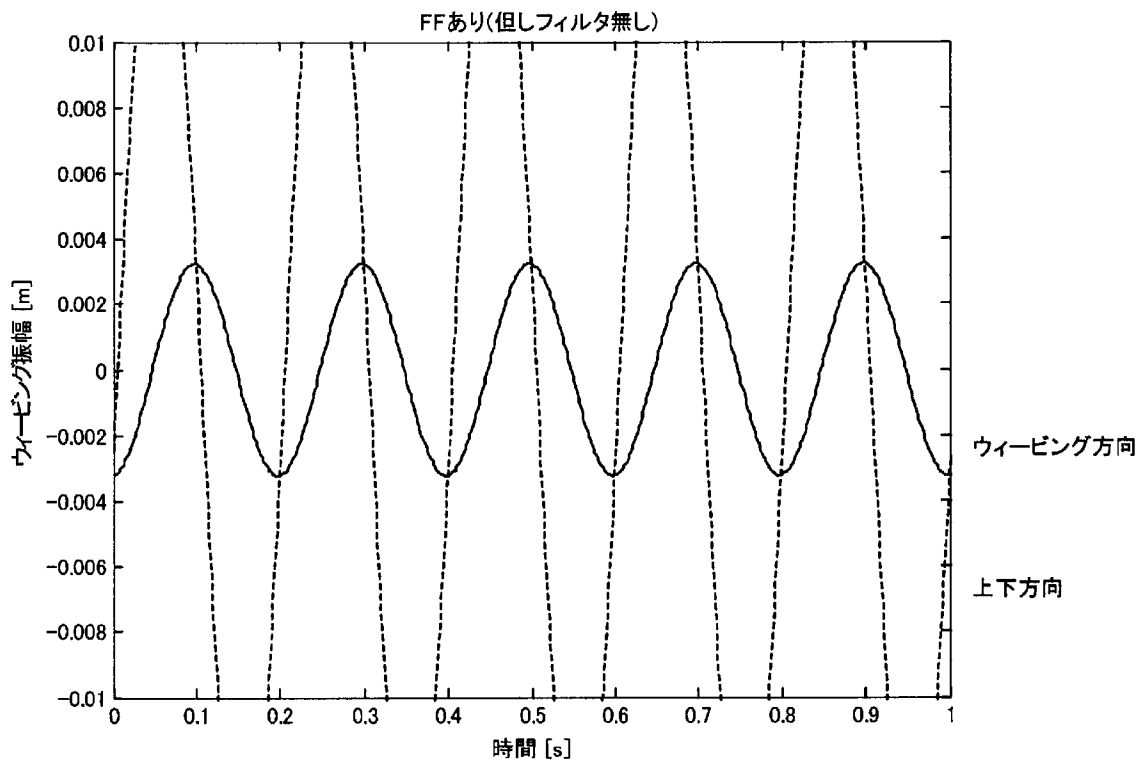
[図5]



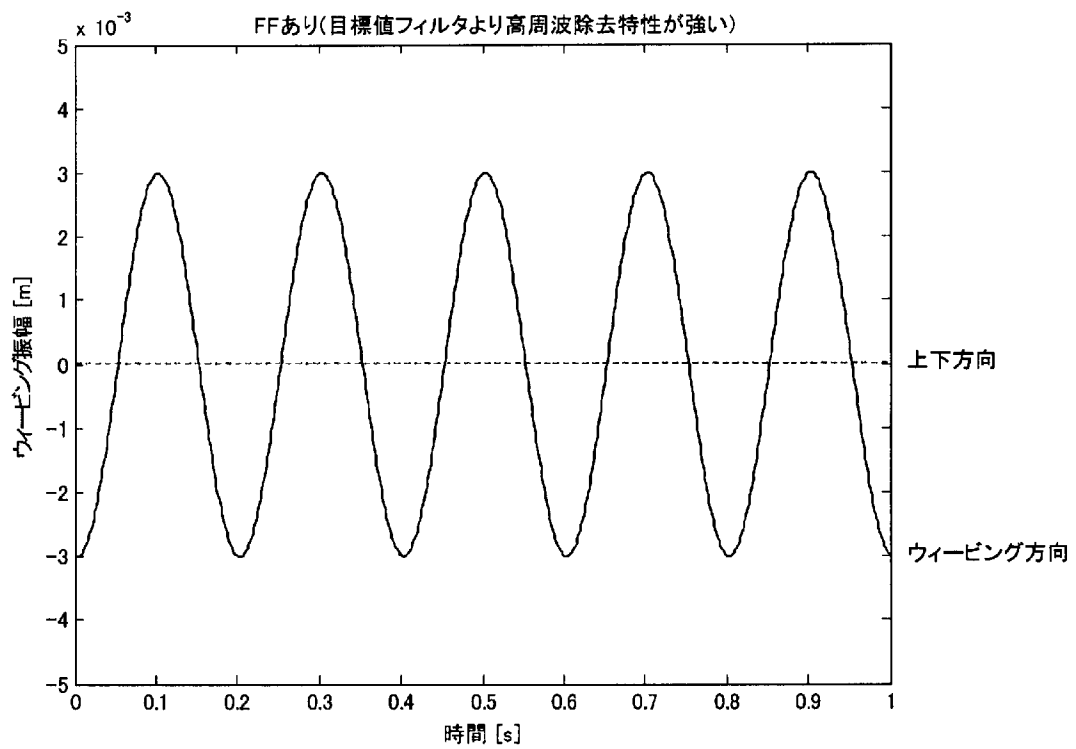
[図6]



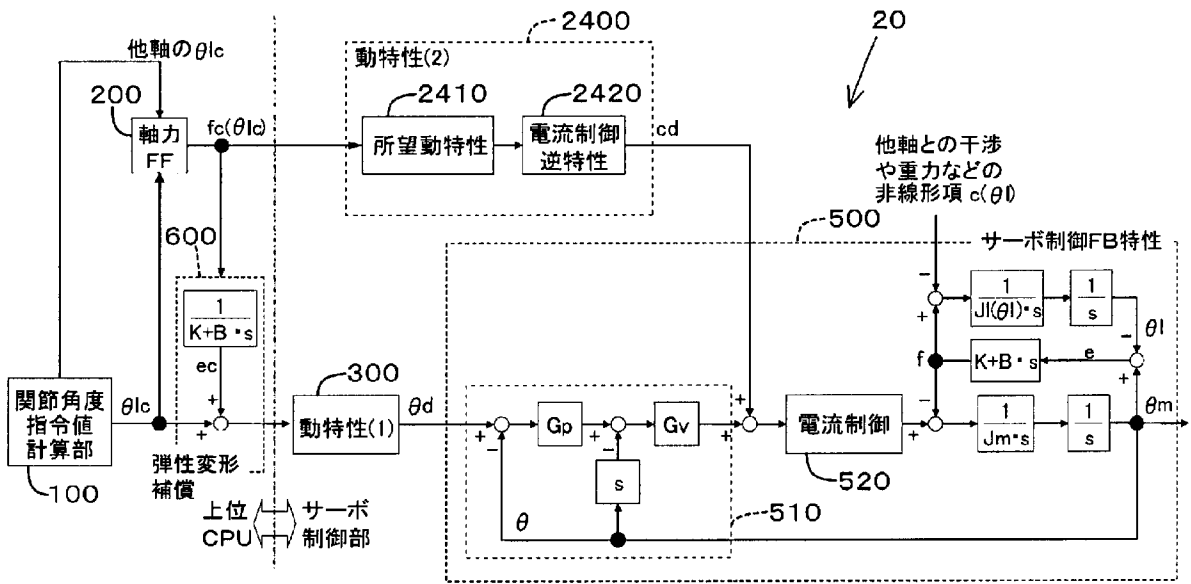
[図7]



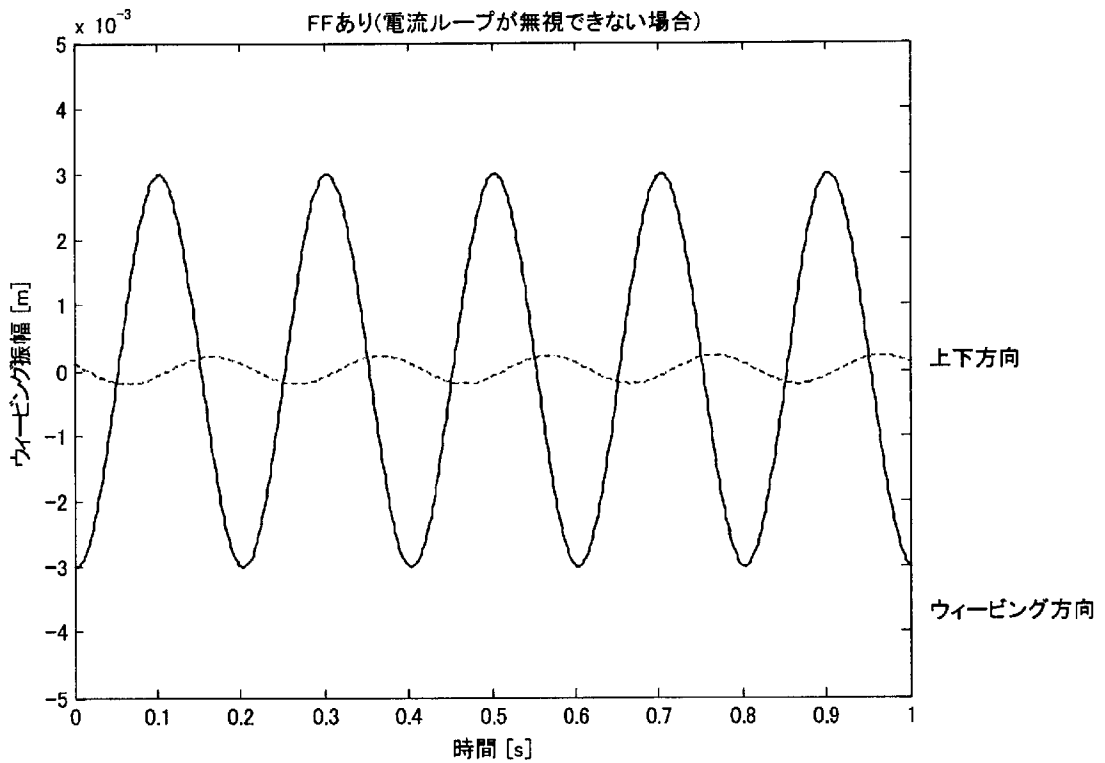
[図8]



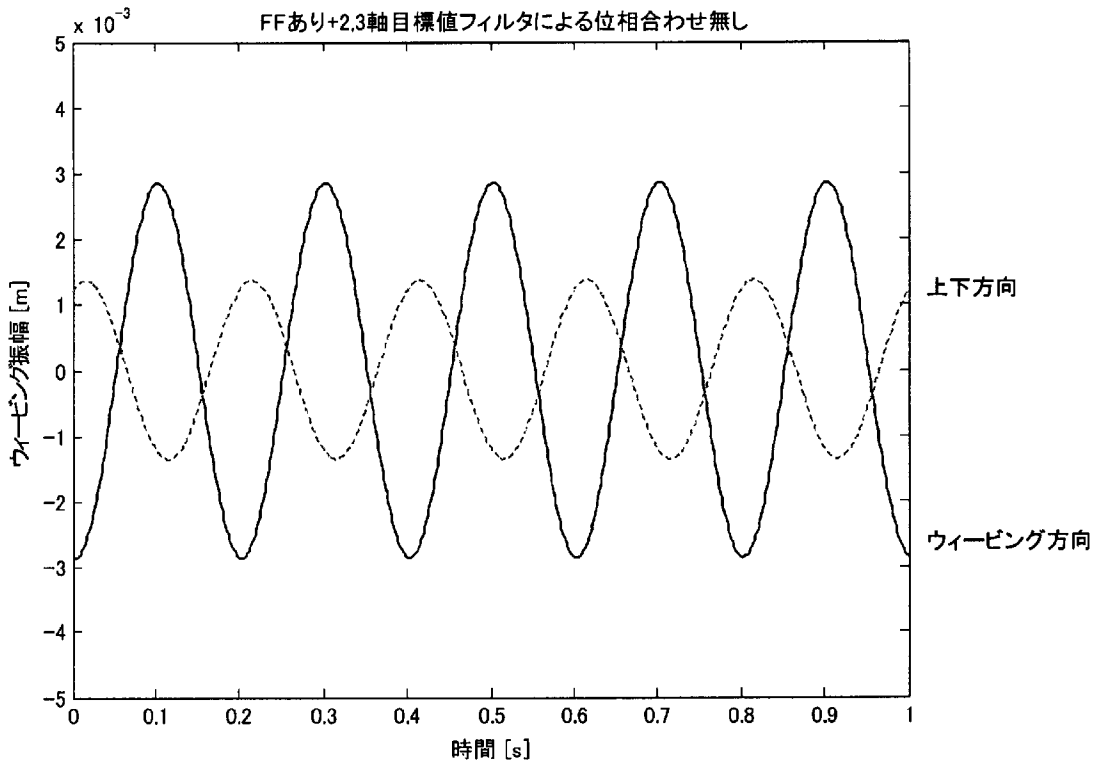
[図9]



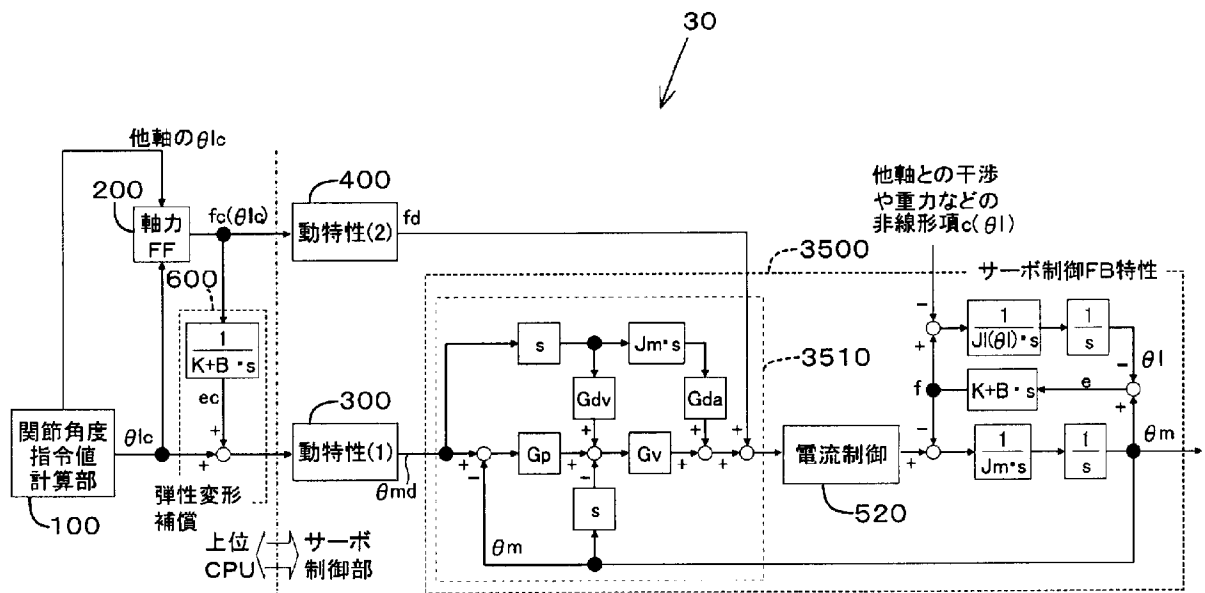
[図10]



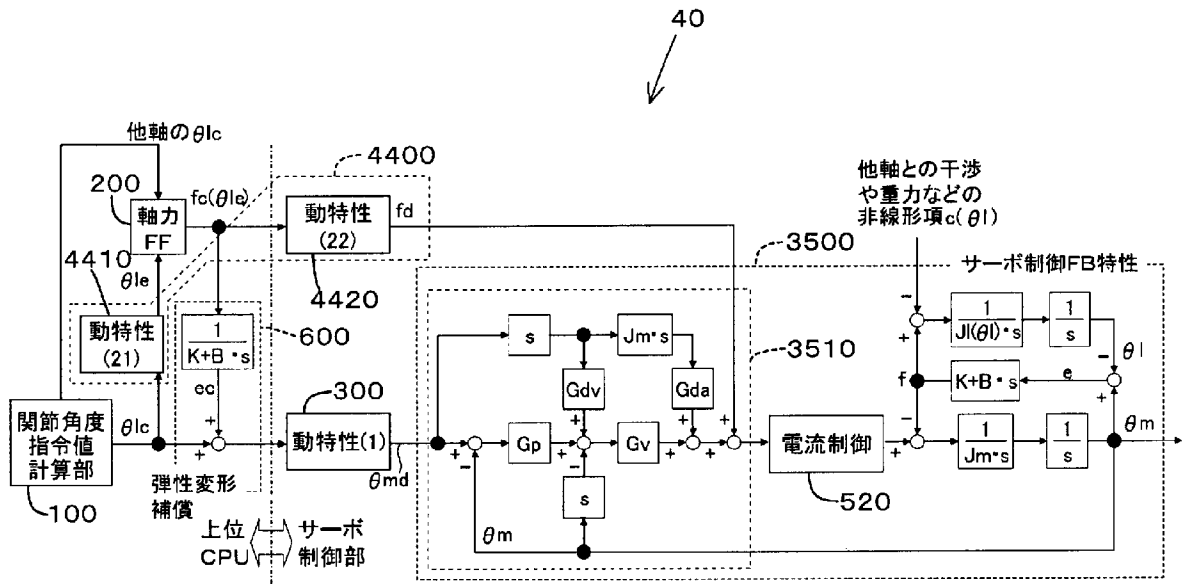
[図11]



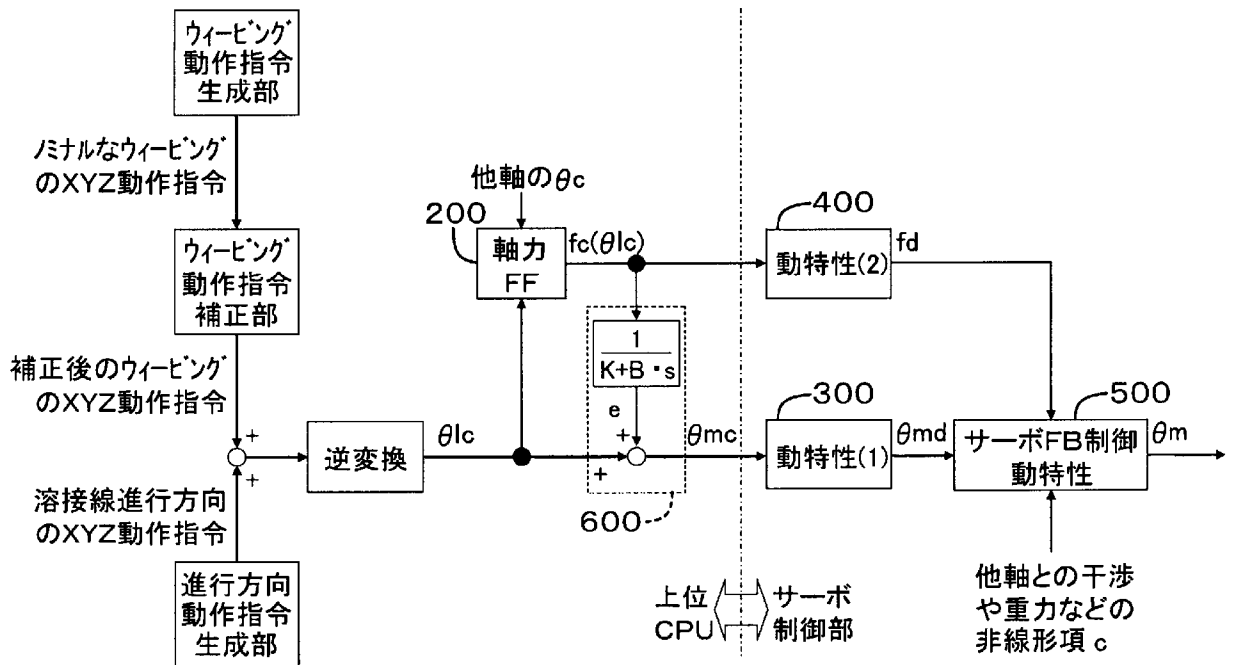
[図12]



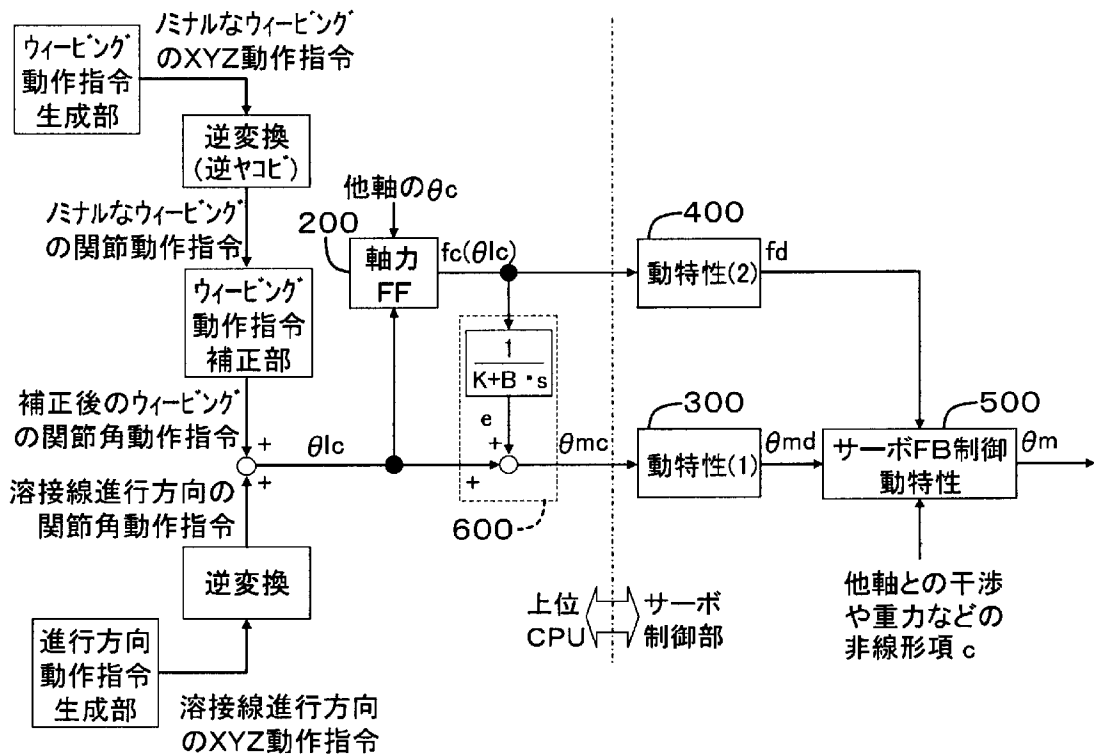
[図13]



[図14]



[図15]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No. PCT/JP2013/065057
--

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
B25J9/10(2006.01) i, B23K9/095(2006.01) i, B23K9/12(2006.01) i, G05B19/4093(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)
B25J9/10, B23K9/095, B23K9/12, G05B19/4093

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

<i>Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1922-1996</i>	<i>Jitsuyo Shinan Toroku Koho</i>	<i>1996-2013</i>
<i>Kokai Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1971-2013</i>	<i>Toroku Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1994-2013</i>

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.
A	<i>JP 2005-186235 A (Yaskawa Electric Corp.), 14 July 2005 (14.07.2005), entire text; all drawings & US 2007/0164695 A1 & WO 2005/063455 A1 & DE 112004002552 T & TWB 00I325361</i>	1-8
A	<i>JP 61-201304 A (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.), 06 September 1986 (06.09.1986), entire text; all drawings (Family: none)</i>	1-8
A	<i>JP 63-212483 A (Toshiba Corp.), 05 September 1988 (05.09.1988), entire text; all drawings & US 4989161 A & EP 280324 A1 & DE 3881903 A & DE 3881903 T</i>	1-8

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"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
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"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
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"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
"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)	"&" document member of the same patent family
"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	

Date of the actual completion of the international search 19 August, 2013 (19.08.13)	Date of mailing of the international search report 03 September, 2013 (03.09.13)
---	---

Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office	Authorized officer
Facsimile No.	Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2013/065057

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 2003-280703 A (Kobe Steel, Ltd.), 02 October 2003 (02.10.2003), entire text; all drawings (Family: none)	1-8
A	JP 2005-102427 A (Kobe Steel, Ltd.), 14 April 2005 (14.04.2005), entire text; all drawings (Family: none)	1-8
A	JP 10-217173 A (Yaskawa Electric Corp.), 18 August 1998 (18.08.1998), entire text; all drawings & WO 1998/034762 A1	1-8
A	JP 10-329063 A (Yaskawa Electric Corp.), 15 December 1998 (15.12.1998), entire text; all drawings & US 6295484 B1 & EP 1023973 A1 & WO 1998/053962 A1 & DE 69838142 D & CA 2291012 A	1-8
A	JP 10-006261 A (Sony Corp.), 13 January 1998 (13.01.1998), entire text; all drawings (Family: none)	1-8

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. B25J9/10(2006.01)i, B23K9/095(2006.01)i, B23K9/12(2006.01)i, G05B19/4093(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. B25J9/10, B23K9/095, B23K9/12, G05B19/4093		
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 1971-2013年 日本国実用新案登録公報 1996-2013年 日本国登録実用新案公報 1994-2013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
A	JP 2005-186235 A (株式会社安川電機) 2005.07.14, 全文、全図 & US 2007/0164695 A1 & WO 2005/063455 A1 & DE 112004002552 T & TWB 00I325361	1-8
A	JP 61-201304 A (松下電器産業株式会社) 1986.09.06, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-8
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 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		
国際調査を完了した日 19.08.2013		国際調査報告の発送日 03.09.2013
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) 松浦 陽 電話番号 03-3581-1101 内線 3324
		3 U 3 7 5 2

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 63-212483 A (株式会社東芝) 1988.09.05, 全文、全図 & US 4989161 A & EP 280324 A1 & DE 3881903 A & DE 3881903 T	1-8
A	JP 2003-280703 A (株式会社神戸製鋼所) 2003.10.02, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-8
A	JP 2005-102427 A (株式会社神戸製鋼所) 2005.04.14, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-8
A	JP 10-217173 A (株式会社安川電機) 1998.08.18, 全文、全図 & WO 1998/034762 A1	1-8
A	JP 10-329063 A (株式会社安川電機) 1998.12.15, 全文、全図 & US 6295484 B1 & EP 1023973 A1 & WO 1998/053962 A1 & DE 69838142 D & CA 2291012 A	1-8
A	JP 10-006261 A (ソニー株式会社) 1998.01.13, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-8