

(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  
2020年12月3日(03.12.2020)



(10) 国際公開番号

WO 2020/240846 A1

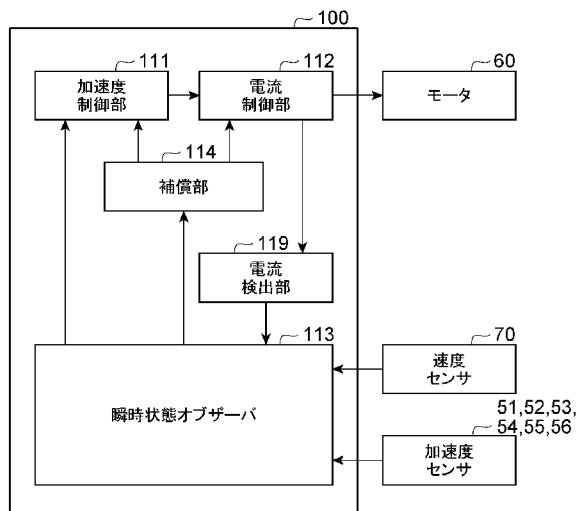
- (51) 国際特許分類:  
**B25J 13/00** (2006.01) **H02P 29/40** (2016.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2019/021796
- (22) 国際出願日: 2019年5月31日(31.05.2019)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人: 株式会社安川電機 (**KABUSHIKI KAISHA YASKAWA DENKI**) [JP/JP]; 〒8060004 福岡県北九州市八幡西区黒崎城石2番1号 Fukuoka (JP). 国立大学法人長岡技術科学大学(**NATIONAL UNIVERSITY CORPORATION NAGAOKA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**) [JP/JP]; 〒9402188 新潟県長岡市上富岡町1603-1 Niigata (JP).
- (72) 発明者: 鈴木 駿介 (**SUZUKI Shunsuke**); 〒9402188 新潟県長岡市上富岡町1603-1 国立大学法人長岡技術科学大学内 Niigata (JP). 川合 勇輔(**KAWAI Yusuke**); 〒9402188 新

潟県長岡市上富岡町1603-1 国立大学法人長岡技術科学大学内 Niigata (JP). 横倉 勇希(**YOKOKURA Yuki**); 〒9402188 新潟県長岡市上富岡町1603-1 国立大学法人長岡技術科学大学内 Niigata (JP). 宮崎 敏昌(**MIYAZAKI Toshimasa**); 〒9402188 新潟県長岡市上富岡町1603-1 国立大学法人長岡技術科学大学内 Niigata (JP). 大石 潔(**OHISHI Kiyoshi**); 〒9402188 新潟県長岡市上富岡町1603-1 国立大学法人長岡技術科学大学内 Niigata (JP). 萬羽 崇(**MAMBA Takashi**); 〒8060004 福岡県北九州市八幡西区黒崎城石2番1号 株式会社安川電機内 Fukuoka (JP). 安藤 慎悟(**ANDO Shingo**); 〒8060004 福岡県北九州市八幡西区黒崎城石2番1号 株式会社安川電機内 Fukuoka (JP).

- (74) 代理人: 長谷川 芳樹, 外(**HASEGAWA Yoshiki et al.**); 〒1000005 東京都千代田区丸の内二丁目1番1号丸の内 M Y P L A Z A (明治安田生命ビル) 9階 創英国際特許法律事務所 Tokyo (JP).

(54) Title: CONTROL DEVICE, CONTROL METHOD, AND ROBOT SYSTEM

(54) 発明の名称: 制御装置、制御方法及びロボットシステム



- 51, 52, 53, 54, 55, 56 Acceleration sensor  
60 Motor  
70 Velocity sensor  
111 Acceleration control unit  
112 Current control unit  
113 Instantaneous state observer  
114 Compensation unit  
119 Current detection unit

(57) Abstract: A controller 100 comprises: a first inertial body 91; an armature 62 that drives the first inertial body 91 in accordance with supply of electric power; a second inertial body 92; a current control unit 112 that outputs driving electric power for causing the driving force of the second inertial body 92 to follow a control target with respect to the armature 62 that is the object of control having a transmission element 83 that transmits motive power from the first inertial body 91 to the second inertial body 92; and a compensation unit 114 that calculates a compensation component to cancel out a feedback component that is generated in the object of control and affects an action of the second inertial body 92, on the basis of the state of the action of the object of control, and adds the compensation component to the driving electric power that the current control unit 112 outputs to the armature 62.

(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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, 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, SA, 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, ST, 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:

一 国際調査報告(条約第21条(3))

---

(57) 要約: コントローラ 100 は、第 1 慣性体 91 と、電力の供給に応じて第 1 慣性体 91 を駆動する電機子 62 と、第 2 慣性体 92 と、第 1 慣性体 91 から第 2 慣性体 92 に動力を伝達する伝達要素 83 とを有する制御対象の電機子 62 に対し、第 2 慣性体 92 の駆動力を制御目標に追従させるための駆動電力を出力する電流制御部 112 と、制御対象内で生じ第 2 慣性体 92 の動作に影響するフィードバック成分を打ち消す補償成分を制御対象の動作状態に基づいて算出し、電流制御部 112 が電機子 62 に出力する駆動電力に加算する補償部 114 と、を備える。

## 明 細 書

**発明の名称：** 制御装置、制御方法及びロボットシステム

### 技術分野

[0001] 本開示は、制御装置、制御方法及びロボットシステムに関する。

### 背景技術

[0002] 特許文献 1 には、外乱オブザーバによりモータへの外乱トルクを推定し、外乱トルクを補償してモータを制御するモータ制御装置が開示されている。

### 先行技術文献

### 特許文献

[0003] 特許文献1：特開 2 0 0 8 - 2 2 8 4 8 4 号公報

### 発明の概要

### 発明が解決しようとする課題

[0004] 本開示は、制御の安定性向上に有効な制御装置、制御方法及びロボットシステムを提供する。

### 課題を解決するための手段

[0005] 本開示の一側面に係る制御装置は、第 1 慣性体と、電力の供給に応じて第 1 慣性体を駆動する電機子と、第 2 慣性体と、第 1 慣性体から第 2 慣性体に動力を伝達する伝達要素とを有する制御対象の電機子に対し、第 2 慣性体の駆動力を制御目標に追従させるための駆動電力を出力する制御部と、制御対象内で生じ第 2 慣性体の動作に影響するフィードバック成分を打ち消す補償成分を制御対象の動作状態に基づいて算出し、制御部が電機子に出力する駆動電力に加算する補償部と、を備える。

[0006] 本開示の他の側面に係る制御方法は、第 1 慣性体と、電力の供給に応じて第 1 慣性体を駆動する電機子と、第 2 慣性体と、第 1 慣性体から第 2 慣性体に動力を伝達する伝達要素とを有する制御対象の電機子に対し、第 2 慣性体の駆動力を制御目標に追従させるための駆動電力を出力することと、制御対象内で生じ第 2 慣性体の動作に影響するフィードバック成分を打ち消す補償

成分を制御対象の動作状態に基づいて算出し、電機子に出力する駆動電力に加算することと、を備える。

[0007] 本開示の更に他の側面に係るロボットシステムは、第1慣性体と、電力の供給に応じて第1慣性体を駆動する電機子と、第2慣性体と、第1慣性体から第2慣性体に動力を伝達する伝達要素とを有するロボットと、第2慣性体の加速度を目標加速度に追従させるための駆動電力を出力する制御部と、ロボット内で生じ第2慣性体の動作に影響するフィードバック成分を打ち消す補償成分をロボットの動作状態に基づいて算出し、制御部が電機子に出力する駆動電力に加算する補償部と、を備える。

### 発明の効果

[0008] 本開示によれば、制御の安定性向上に有効な制御装置、制御方法及びロボットシステムを提供することができる。

### 図面の簡単な説明

[0009] [図1]ロボットシステムを例示する模式図である。

[図2]アクチュエータの構造を例示する模式図である。

[図3]アクチュエータ及びその駆動対象をモデル化して示すブロック線図である。

[図4]コントローラの機能構成図である。

[図5]瞬時状態オブザーバによる状態推定手順を例示するブロック線図である。

[図6]加速度制御部による制御手順を例示するブロック線図である。

[図7]電流制御部による制御手順を例示するブロック線図である。

[図8]補償部の作用を例示するブロック線図である。

[図9]コントローラのハードウェア構成図である。

[図10]コントローラの応用例を示す機能構成図である。

[図11]速度制御部による制御手順を例示するブロック線図である。

[図12]コントローラの他の応用例を示す機能構成図である。

[図13]位置制御部による制御手順を例示するブロック線図である。

[図14]コントローラの更に他の応用例を示す機能構成図である。

[図15]アクチュエータ及びその駆動対象と、駆動対象の外部環境とをモデル化して示すブロック線図である。

[図16]力制御部による制御手順を例示するブロック線図である。

[図17]コントローラの更に他の応用例を示す機能構成図である。

[図18]ハイブリッド制御部による制御手順を例示するブロック線図である。

### 発明を実施するための形態

[0010] 以下、実施形態について、図面を参照しつつ詳細に説明する。説明において、同一要素又は同一機能を有する要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

[0011] [ロボットシステム]

ロボットシステム1は、ロボットに予め設定された制御目標に従って動作させるシステムである。図1に例示するように、ロボットシステム1は、制御対象の一例であるロボット10と、コントローラ100とを備える。

[0012] (ロボット)

ロボット10は、例えば6軸の垂直多関節ロボットであり、基部11と、旋回部12と、第1アーム13と、第2アーム14と、手首部15と、先端部16と、アクチュエータ41, 42, 43, 44, 45, 46と、加速度センサ51, 52, 53, 54, 55, 56とを有する。

[0013] 基部11は、床面又は台車等に固定される。旋回部12は基部11上に設けられており、鉛直な軸線21まわりに旋回可能である。すなわちロボット10は、軸線21まわりに旋回部12を旋回可能とする関節31を有する。

[0014] 第1アーム13は、旋回部12から延出しており、軸線21に交差（例えば直交）する軸線22まわりに揺動可能である。すなわちロボット10は、軸線22まわりに第1アーム13を揺動可能とする関節32を有する。なお、ここでの交差は、所謂立体交差のように互いにねじれの関係にある状態での交差を含む。以下においても同様である。

[0015] 第2アーム14は、第1アーム13の先端部から延出しており、軸線21

に交差（例えば直交）する軸線 2 3 まわりに揺動可能である。すなわちロボット 1 0 は、軸線 2 3 まわりに第 2 アーム 1 4 を揺動可能とする関節 3 3 を有する。軸線 2 3 は軸線 2 2 と平行であってもよい。

[0016] 第 2 アーム 1 4 の先端部は、第 2 アーム 1 4 の延出方向に沿って軸線 2 3 に交差（例えば直交）する軸線 2 4 まわりに旋回可能である。すなわちロボット 1 0 は、軸線 2 4 まわりに第 2 アーム 1 4 の先端部を旋回可能とする関節 3 4 を有する。

[0017] 手首部 1 5 は、第 2 アーム 1 4 の先端部から延出しており、軸線 2 4 に交差（例えば直交）する軸線 2 5 まわりに揺動可能である。すなわちロボット 1 0 は、軸線 2 5 まわりに手首部 1 5 を揺動可能とする関節 3 5 を有する。

[0018] 先端部 1 6 は、手首部 1 5 の先端部に設けられており、手首部 1 5 の延出方向に沿って軸線 2 5 に交差（例えば直交）する軸線 2 6 まわりに旋回可能である。すなわちロボット 1 0 は、軸線 2 6 まわりに先端部 1 6 を旋回可能とする関節 3 6 を有する。先端部 1 6 には、作業用の様々なツールが設けられる。ツールの具体例としては、ワークを保持するためのハンド、塗料を吐出する塗装ガン、及び溶接トーチ等が挙げられる。

[0019] アクチュエータ 4 1, 4 2, 4 3, 4 4, 4 5, 4 6 は、関節 3 1, 3 2, 3 3, 3 4, 3 5, 3 6 をそれぞれ駆動する。例えばアクチュエータ 4 1 は軸線 2 1 まわりに旋回部 1 2 を旋回させ、アクチュエータ 4 2 は軸線 2 2 まわりに第 1 アーム 1 3 を揺動させ、アクチュエータ 4 3 は軸線 2 3 まわりに第 2 アーム 1 4 を揺動させ、アクチュエータ 4 4 は軸線 2 4 まわりに第 2 アーム 1 4 の先端部を旋回させ、アクチュエータ 4 5 は軸線 2 5 まわりに手首部 1 5 を揺動させ、アクチュエータ 4 6 は軸線 2 6 まわりに先端部 1 6 を旋回させる。

[0020] 加速度センサ 5 1, 5 2, 5 3, 5 4, 5 5, 5 6 のそれぞれは、駆動対象部分に取り付けられている。加速度センサ 5 1, 5 2, 5 3, 5 4, 5 5, 5 6 は、アクチュエータ 4 1, 4 2, 4 3, 4 4, 4 5, 4 6 による駆動対象部分（以下、単に「駆動対象部分」という。）の加速度をそれぞれ検出

する。

[0021] なお、加速度センサ 5 1, 5 2, 5 3, 5 4, 5 5, 5 6 は、加速度に相関する何らかの物理量を検出するセンサであればよく、ロボット 1 0 は、必ずしも加速度自体を検出するセンサを有していなくてよい。例えば加速度センサ 5 1, 5 2, 5 3, 5 4, 5 5, 5 6 は、アクチュエータ 4 1, 4 2, 4 3, 4 4, 4 5, 4 6 の駆動対象の駆動力をそれぞれ検出する力センサ（例えばトルクセンサ）であってもよい。

[0022] また、ロボット 1 0 は、アクチュエータ 4 1, 4 2, 4 3, 4 4, 4 5, 4 6 ごとに加速度センサを有するのに代えて、アクチュエータ 4 1, 4 2, 4 3, 4 4, 4 5, 4 6 のいずれによっても駆動される先端部 1 6 に加速度センサを有していてもよい。例えばロボット 1 0 は、先端部 1 6 に 6 軸（並進 3 軸及び回転 3 軸）の加速度センサを有していてもよい。

[0023] 図 2 に示すように、アクチュエータ 4 1, 4 2, 4 3, 4 4, 4 5, 4 6 のそれぞれは、モータ 6 0 と、速度センサ 7 0 と、減速機 8 0 とを有する。モータ 6 0 は、ロータ 6 1 と、電力の供給に応じてロータ 6 1 を回転駆動する電機子 6 2 とを有する。速度センサ 7 0 は、ロータ 6 1 の回転速度を検出する。速度センサ 7 0 の具体例としては、ロータリーエンコーダ等のパルスジェネレータ、及びタコジェネレータ等が挙げられる。

[0024] 減速機 8 0 は、ロータ 6 1 に接続される入力軸 8 1 と、駆動対象部分に接続される出力軸 8 2 と、入力軸 8 1 から出力軸 8 2 に駆動力を伝達する伝達要素 8 3 とを有する。伝達要素 8 3 は、例えば少なくとも一つのギヤにより構成されており、入力軸 8 1 の回転速度に所定の減速比を乗算して出力軸 8 2 に伝達し、入力軸 8 1 の回転トルクに上記減速比の逆数を乗算して出力軸 8 2 に伝達する。

[0025] ロータ 6 1 と駆動対象部分との間には、伝達要素 8 3 の変形等に起因する撓みが生じる。そこで、アクチュエータ 4 1, 4 2, 4 3, 4 4, 4 5, 4 6 及びその駆動対象部分は、ロータ 6 1 を主体とする第 1 慣性体 9 1 と、電力の供給に応じて第 1 慣性体 9 1 を駆動する電機子 6 2 と、駆動対象部分を

主体とする第2慣性体92と、第1慣性体91から第2慣性体92に力を伝達する伝達要素83とによって近似可能である。

[0026] このように近似されたモデルにおいては、図3の伝達関数TF01で示されるように、電機子62からの電流 $I_q$ に所定のトルク定数 $K_T$ を乗算した大きさの駆動力（例えばトルク $T_M$ ）が第1慣性体91に生じる。これに応じ、第1慣性体91は、伝達関数TF02で示されるように、トルク $T_M$ を第1慣性体91のイナーシャ $J_M$ で除算した大きさの加速度 $a_M$ で加速される。更に、伝達関数TF03で示されるように、加速度 $a_M$ が積分されて第1慣性体91が速度 $\omega_M$ で動作する。

[0027] 第1慣性体91の速度 $\omega_M$ は、伝達関数TF04で示されるように、減速比 $R_g$ で除算された大きさの速度 $\omega_{Mt}$ として第2慣性体92側に伝わる。第1慣性体91から第2慣性体92側に伝わる速度 $\omega_{Mt}$ と、第2慣性体92の速度 $\omega_L$ との間に差（以下、この差を「差速度 $\omega_s$ 」という。）が生じると、伝達関数TF05で示されるように差速度 $\omega_s$ が積分されて撓み角 $\theta_s$ が生じる。更に、伝達関数TF06で示されるように、撓み角 $\theta_s$ に所定のばね定数 $K_s$ を乗算した大きさの駆動力（例えばトルク $T_s$ ）が第2慣性体92に伝わる。

[0028] また、第2慣性体92には、外乱のトルク $T_{dis}$ も伝わる。このため、加え合わせ点APO1で示されるように、第2慣性体92には、トルク $T_s$ からトルク $T_{dis}$ を減算したトルク $T_L$ が伝わる。

[0029] これに応じ、第2慣性体92は、伝達関数TF07で示されるように、トルク $T_L$ を第2慣性体92のイナーシャ $J_L$ で除算した大きさの加速度 $a_L$ で加速される。更に、伝達関数TF08で示されるように、加速度 $a_L$ が積分されて第2慣性体92が速度 $\omega_L$ で動作する。

[0030] 上述した第1慣性体91から第2慣性体92への力、加速度及び速度の伝達成分に加えて、第1慣性体91と第2慣性体92の間には複数のフィードバック成分が生じる。例えば、伝達関数TF09で示されるように、上記トルク $T_s$ を減速比 $R_g$ で除算した大きさのトルク $T_{st}$ が反力として伝達要素83から第1慣性体91に伝わる。このため、加え合わせ点APO2で示さ

れるように、第1慣性体91には、トルク $T_M$ からトルク $T_{st}$ を減算したトルク $T_R$ が伝わる。また、第2慣性体92の速度 $\omega_L$ が、上記差速度 $\omega_s$ を定める速度成分として第2慣性体92から伝達要素83に伝わる。

[0031] 更に、第1慣性体91の速度 $\omega_M$ に比例する粘性抵抗が第1慣性体91に生じ、第2慣性体92の速度 $\omega_L$ に比例する粘性抵抗が第2慣性体92に生じる。具体的には、伝達関数TF11で示されるように、速度 $\omega_M$ に粘性係数 $D_M$ を乗算した大きさのトルク $T_{dm}$ が第1慣性体91に作用する。このため、加え合わせ点APO2で示されるように、上記トルク $T_R$ は、トルク $T_M$ からトルク $T_{st}$ を減算し、更にトルク $T_{dm}$ を減算した値となる。

[0032] また、伝達関数TF12で示されるように、速度 $\omega_L$ に粘性係数 $D_L$ を乗算した大きさのトルク $T_{dl}$ が第2慣性体92に作用する。このため、加え合わせ点APO1で示されるように、第2慣性体92には、トルク $T_s$ からトルク $T_{dis}$ を減算し、更にトルク $T_{dl}$ を減算したトルク $T_L$ が伝わる。

[0033] このように、第1慣性体91と第2慣性体92との間に生じるフィードバック成分の具体例としては、伝達要素83から第1慣性体91に入力される反力であるフィードバック成分FBO1と、第2慣性体92から伝達要素83に入力される第2慣性体92の動作速度であるフィードバック成分FBO2と、第1慣性体91に生じる粘性抵抗であるフィードバック成分FBO3と、第2慣性体92に生じる粘性抵抗であるフィードバック成分FBO4とが挙げられる。

[0034] コントローラ100（制御装置）は、電機子62に対し、第2慣性体92の駆動力を制御目標に追従させるための駆動電力を出力することと、制御対象（例えばロボット10）内で生じ第2慣性体92の動作に影響するフィードバック成分を打ち消す補償成分を制御対象の動作状態に基づいて算出し、電機子に出力する駆動電力に加算することと、を実行するように構成されている。

[0035] 図4は、コントローラ100の少なくとも一部と機能的に等価な構成を示す図である。図4に示すように、コントローラ100は、機能上の構成（以

下、「機能ブロック」という。)として、加速度制御部 111 と、電流制御部 112 と、瞬時状態オブザーバ 113 と、補償部 114 と、電流検出部 119 とを有する。

[0036] 加速度制御部 111 は、第 2 慣性体 92 の加速度  $a_L$  を目標加速度とするトルク目標値（制御目標）に第 2 慣性体 92 の駆動トルク（駆動力）を近づけるように、第 1 慣性体 91 の駆動トルクの目標値を算出することを所定の制御周期で繰り返し実行する。

[0037] 電流制御部 112（制御部）は、加速度制御部 111 がトルク目標値を算出する度に、第 1 慣性体 91 の駆動トルクを当該トルク目標値とするための電流を電機子 62 に出力する。電流検出部 119 は、電流制御部 112 が電機子 62 に出力する電流を検出する。

[0038] 瞬時状態オブザーバ 113 は、第 2 慣性体 92 の加速度に相関する物理量に基づいて制御対象の状態を推定する。例えば瞬時状態オブザーバ 113 は、加速度センサ 51, 52, 53, 54, 55, 56 による検出値と、速度センサ 70 による検出値と、電流検出部 119 による検出値とに基づいて、第 2 慣性体 92 の速度及び撓み角等を推定する。

[0039] 補償部 114 は、制御対象内で生じ第 2 慣性体 92 の動作に影響するフィードバック成分を打ち消す補償成分を制御対象の動作状態に基づいて算出し、電流制御部 112 が電機子 62 に出力する駆動電力に加算する。

[0040] 補償部 114 は、伝達要素 83 から第 1 慣性体 91 に入力されるフィードバック成分を打ち消す第 1 補償成分と、第 2 慣性体 92 から伝達要素 83 に入力されるフィードバック成分を打ち消す第 2 補償成分とを制御対象の動作状態に基づいて算出し、電流制御部 112 が電機子 62 に出力する駆動電力に加算してもよい。例えば補償部 114 は、伝達要素 83 から第 1 慣性体 91 に入力される反力である上記フィードバック成分  $F_{B01}$  を打ち消すように第 1 補償成分を算出し、第 2 慣性体 92 から伝達要素 83 に入力される第 2 慣性体 92 の動作速度であるフィードバック成分  $F_{B02}$  を打ち消すように第 2 補償成分を算出する。

[0041] 補償部 114 は、第 1 慣性体 91 に生じる粘性抵抗であるフィードバック成分 FBO3 を打ち消す第 3 補償成分と、第 2 慣性体 92 に生じる粘性抵抗であるフィードバック成分 FBO4 を打ち消す第 4 補償成分とを、電流制御部 112 が電機子 62 に出力する駆動電力に更に加算してもよい。

[0042] 補償部 114 は、第 2 慣性体 92 の加速度に相関する物理量の同時点の検出値に基づいて第 1 補償成分及び第 2 補償成分を算出してもよい。また、補償部 114 は、上記物理量の同時点の検出値に基づいて第 1 補償成分、第 2 補償成分、第 3 補償成分及び第 4 補償成分を算出してもよい。

[0043] 補償部 114 は、第 1 補償成分及び第 2 補償成分の少なくとも一方を瞬時状態オブザーバ 113 により算出してもよい。例えば補償部 114 は、各制御周期において、加速度センサ 51, 52, 53, 54, 55, 56 が検出した加速度と、速度センサ 70 が検出した第 1 慣性体 91 の動作速度と、電流検出部 119 が検出した電流とに基づき瞬時状態オブザーバ 113 が推定した制御対象の動作状態に基づいて上記第 1 補償成分、第 2 補償成分、第 3 補償成分及び第 4 補償成分を算出する。

[0044] [制御手順]

続いて、制御方法の一例として、コントローラ 100 が実行する制御手順を具体的に例示する。この制御手順は、電機子 62 に対し、第 2 慣性体 92 の駆動力を制御目標に追従させるための駆動電力を出力することと、制御対象内で生じ第 2 慣性体 92 の動作に影響するフィードバック成分を打ち消す補償成分を制御対象の動作状態に基づいて算出し、電機子 62 に出力する駆動電力に加算することを含む。

[0045] 上記第 1 補償成分と、上記第 2 補償成分とを制御対象の動作状態に基づいて算出し、電機子 62 に出力する駆動電力に加算してもよい。例えば上記フィードバック成分 FBO1 を打ち消すように第 1 補償成分を算出し、上記フィードバック成分 FBO2 を打ち消すように第 2 補償成分を算出してもよい。第 2 慣性体 92 の加速度に相関する物理量の同時点の検出値に基づいて第 1 補償成分及び第 2 補償成分を算出してもよい。第 1 補償成分及び第 2 補償

成分の少なくとも一方を瞬時状態オブザーバ113により算出してもよい。

[0046] この制御手順は、瞬時状態オブザーバ113による状態推定手順と、加速度制御部111による第1慣性体91のトルク目標値の算出手順と、電流制御部112による駆動電力の出力手順と、補償部114による補償成分の加算手順とを含む。以下、各手順を詳細に例示する。

[0047] (状態推定手順)

図5に示すように、電流制御部112が電機子62に出力する電流 $I_q$ は、伝達関数TF21で示される遅れをもって電流検出部119により検出され、その検出結果である電流検出値 $I_{q\_sens}$ が瞬時状態オブザーバ113に入力される。

[0048] また、第2慣性体92の加速度 $a_L$ は、伝達関数TF22で示される遅れをもって加速度センサ51, 52, 53, 54, 55, 56により検出され、その検出結果である加速度検出値 $a_{L\_sens}$ が瞬時状態オブザーバ113に更に入力される。

[0049] 第1慣性体91の速度 $\omega_M$ は、伝達関数TF23で示される遅れをもって速度センサ70により検出され、その検出結果である速度検出値 $\omega_{M\_sens}$ が瞬時状態オブザーバ113に更に入力される。

[0050] 瞬時状態オブザーバ113は、電流検出値 $I_{q\_sens}$ 、加速度検出値 $a_{L\_sens}$ 及び速度検出値 $\omega_{M\_sens}$ に基づいて、第2慣性体92の速度推定値 $\omega_{L\_ob}$ 、第1慣性体91の速度推定値 $\omega_{M\_ob}$ 、及び伝達要素83の撓み角推定値 $\theta_{s\_ob}$ を算出する。なお、速度推定値 $\omega_{M\_ob}$ は、速度検出値 $\omega_{M\_sens}$ と同じである。

[0051] (トルク目標値の算出手順)

図6に示すように、加速度制御部111は、第2慣性体92の駆動トルク(上記トルク $T_L$ )の目標値であるトルク目標値 $T_{L\_ref}$ と、第2慣性体92の駆動トルクのフィードバック値であるトルクフィードバック値 $T_{L\_fb}$ とを算出し、これらの偏差(以下、「トルク偏差」という。)を算出する。例えば伝達関数TF31で示されるように、加速度制御部111は、加速度目標

値  $a_{L\_ref}$  にイナーシャモデル値  $J_{Ln}$  を乗算してトルク目標値  $T_{L\_ref}$  を算出する。イナーシャモデル値  $J_{Ln}$  は、第2慣性体92のイナーシャのモデル値であり、コントローラ100が保持している。

[0052] 伝達関数TF32で示されるように、加速度制御部111は、第2慣性体92の加速度検出値  $a_{L\_sens}$  にイナーシャモデル値  $J_{Ln}$  を乗算してトルクフィードバック値  $T_{L\_fb}$  を算出する。加え合わせ点AP31で示されるように、加速度制御部111は、トルク目標値  $T_{L\_ref}$  からトルクフィードバック値  $T_{L\_fb}$  を減算して上記トルク偏差を算出する。

[0053] 次に加速度制御部111は、伝達要素83に入力する差速度  $\omega_s$  の目標値である差速度目標値  $\omega_{s\_ref}$  と、差速度  $\omega_s$  のフィードバック値である差速度フィードバック値  $\omega_{s\_fb}$  とを算出し、これらの偏差（以下、「差速度偏差」という。）を算出する。例えば伝達関数TF33, TF34で示されるように、加速度制御部111は、加速度ゲイン  $g_a$  とばね定数モデル値  $K_{sn}$  の逆数とをトルク偏差に乘算して差速度目標値  $\omega_{s\_ref}$  を算出する。加速度ゲイン  $g_a$  は予め設定された定数であり、ばね定数モデル値  $K_{sn}$  は伝達要素83のばね定数  $K_s$  のモデル値であり、いずれもコントローラ100が保持している。

[0054] 伝達関数TF35で示されるように、加速度制御部111は、第1慣性体91の速度検出値  $\omega_{M\_sens}$  に減速比モデル値  $R_{gn}$  を乗算して理想速度  $\omega_{L\_id}$  を算出する。減速比モデル値  $R_{gn}$  は、伝達要素83の減速比のモデル値であり、コントローラ100が保持している。理想速度  $\omega_{L\_id}$  は、差速度  $\omega_s$  がゼロである場合の速度  $\omega_L$  である。

[0055] 加え合わせ点AP32で示されるように、加速度制御部111は、第2慣性体92の速度推定値  $\omega_{L\_ob}$  から理想速度  $\omega_{L\_id}$  を減算して差速度フィードバック値  $\omega_{s\_fb}$  を算出する。

[0056] 加え合わせ点AP33で示されるように、加速度制御部111は、差速度目標値  $\omega_{s\_ref}$  から差速度フィードバック値  $\omega_{s\_fb}$  を減算して上記差速度偏差を算出する。

[0057] 次に、加速度制御部111は、差速度偏差に基づいて、第1慣性体91の

駆動トルクの目標値であるトルク目標値  $T_{M\_ref}$  を算出する。例えば加速度制御部 111 は、伝達関数 TF37, TF38 で示されるように差速度偏差に差速度ゲイン  $g_v$  を乗算して加速度目標値  $a_{M\_ref}$  を算出し、加速度目標値  $a_{M\_ref}$  にイナーシャモデル値  $J_{Mn}$  及び減速比モデル値  $R_{gn}$  を乗算してトルク目標値  $T_{M\_ref}$  を算出する。差速度ゲイン  $g_v$  は予め設定された定数であり、イナーシャモデル値  $J_{Mn}$  は第 1 慣性体 91 のイナーシャのモデル値であり、いずれもコントローラ 100 が保持している。以上で、1 制御周期におけるトルク目標値の算出手順が完了する。

[0058] (駆動電力の出力手順)

図 7 に示すように、電流制御部 112 は、トルク目標値  $T_{M\_ref}$  に基づいて電流目標値  $I_{q\_ref}$  を算出し、電流目標値  $I_{q\_ref}$  に応じた電流  $I_q$  を電機子 62 に出力する。例えば伝達関数 TF41 で示されるように、電流制御部 112 は、トルク定数モデル値  $K_{tn}$  の逆数をトルク目標値  $T_{M\_ref}$  に乗算して電流目標値  $I_{q\_ref}$  を算出する。トルク定数モデル値  $K_{tn}$  は、上記トルク定数  $K_T$  のモデル値であり、コントローラ 100 が保持している。

[0059] 電流制御部 112 は、電流目標値  $I_{q\_ref}$  に対し、伝達関数 TF42 で示される遅れをもって電流目標値  $I_{q\_ref}$  に従う電流  $I_q$  を算出し、電機子 62 に出力する。

[0060] (補償成分の加算手順)

図 6 において加え合わせ点 AP34 で示されるように、補償部 114 は、上記加速度目標値  $a_{M\_ref}$  に加速度検出値  $a_{L\_sens}$  を加算する。ここで加算された加速度検出値  $a_{L\_sens}$  は、伝達関数 TF38, TF41, TF42 を経て上記第 2 補償成分となる。換言すると、補償部 114 は上記第 2 補償成分を算出して電流  $I_q$  に加算する。第 2 補償成分は、伝達関数 TF01, TF02, TF03, TF04 を経て差速度  $\omega_s$  に相当する値となり、フィードバック成分 FB02 を打ち消す。

[0061] 加速度検出値  $a_{L\_sens}$  の加算箇所は必ずしも加え合わせ点 AP34 に限られない。例えば補償部 114 は、加速度検出値  $a_{L\_sens}$  にイナーシャモデル

値  $J_{Mn}$  及び減速比モデル値  $R_{gn}$  を乗算した値をトルク目標値  $T_{M\_ref}$  に加算してもよい。

[0062] 伝達関数  $TF51$  で示されるように、補償部 114 は、速度推定値  $\omega_{Lob}$  に粘性係数モデル値  $D_{Ln}$  を乗算して第 2 慣性体 92 に生じる粘性抵抗を算出し、これを加え合わせ点  $AP31$  でトルク目標値  $T_{L\_ref}$  に加算する。粘性係数モデル値  $D_{Ln}$  は上記粘性係数  $D_L$  のモデル値であり、コントローラ 100 が保持している。

[0063] ここで加算された粘性抵抗は、伝達関数  $TF33$ ,  $TF34$ ,  $TF37$ ,  $TF38$ ,  $TF41$ ,  $TF42$  を経て上記第 4 補償成分となる。換言すると、補償部 114 は上記第 4 補償成分を算出して電流  $I_q$  に加算する。第 4 補償成分は、伝達関数  $TF01$ ,  $TF02$ ,  $TF03$ ,  $TF04$ ,  $TF05$ ,  $TF06$  を経て第 2 慣性体 92 の粘性抵抗に相当する値となり、フィードバック成分  $FB04$  を打ち消す。

[0064] 粘性抵抗の加算箇所は必ずしも加え合わせ点  $AP31$  に限られない。例えば補償部 114 は、粘性抵抗に加速度ゲイン  $g_a$  とばね定数モデル値  $K_{sn}$  の逆数とを乗算して差速度目標値  $\omega_{s\_ref}$  に加算してもよい。

[0065] 図 7 の伝達関数  $TF52$ ,  $TF53$  で示されるように、補償部 114 は、撓み角推定値  $\theta_{sob}$  にばね定数モデル値  $K_{sn}$  を乗算し、更にこれに減速比モデル値  $R_{gn}$  の逆数を乗算してトルク推定値  $T_{sob}$  を算出する。トルク推定値  $T_{sob}$  は、伝達要素 83 から第 2 慣性体 92 に伝わる上記トルク  $T_s$  の推定値である。加え合わせ点  $AP35$  で示されるように、補償部 114 は、トルク目標値  $T_{M\_ref}$  にトルク推定値  $T_{sob}$  を加算する。

[0066] ここで加算されたトルク推定値  $T_{sob}$  は、伝達関数  $TF41$ ,  $TF42$  を経て上記第 1 補償成分となる。換言すると、補償部 114 は第 1 補償成分を算出して電流  $I_q$  に加算する。第 1 補償成分は、伝達関数  $TF01$  を経てトルク  $T_s$  に相当する値となり、フィードバック成分  $FB01$  を打ち消す。

[0067] トルク推定値  $T_{sob}$  の加算箇所は必ずしも加え合わせ点  $AP35$  に限られない。例えば補償部 114 は、トルク推定値  $T_{sob}$  にトルク定数モデル値  $K_t$

$n$  の逆数を乗算して電流目標値  $I_{q\_ref}$  に加算してもよい。

[0068] 伝達関数  $TF_{54}$  で示されるように、補償部 114 は、速度検出値  $\omega_{M\_sen}$  に粘性係数モデル値  $D_{Mn}$  を乗算して第 1 慣性体 91 に生じる粘性抵抗を算出し、これを加え合わせ点  $AP_{35}$  でトルク目標値  $T_{M\_ref}$  に加算する。粘性係数モデル値  $D_{Mn}$  は上記粘性係数  $D_M$  のモデル値であり、コントローラ 100 が保持している。

[0069] ここで加算された粘性抵抗は、伝達関数  $TF_{41}$ 、 $TF_{42}$  を経て上記第 3 補償成分となる。換言すると、補償部 114 は上記第 3 補償成分を算出して電流  $I_q$  に加算する。第 3 補償成分は、伝達関数  $TF_{01}$  を経て第 1 慣性体 91 の粘性抵抗に相当する値となり、フィードバック成分  $FB_{03}$  を打ち消す。

[0070] 粘性抵抗の加算箇所は必ずしも加え合わせ点  $AP_{35}$  に限られない。例えば補償部 114 は、粘性抵抗にトルク定数モデル値  $K_{tn}$  の逆数を乗算して電流目標値  $I_{q\_ref}$  に加算してもよい。

[0071] このように、補償部 114 が第 1 補償成分、第 2 補償成分、第 3 補償成分、及び第 4 補償成分を電流  $I_q$  に加算することによって、フィードバック成分  $FB_{01}$ 、 $FB_{02}$ 、 $FB_{03}$ 、 $FB_{04}$  が打ち消され、図 3 のブロック線図が図 8 のように変形される。これにより、第 1 慣性体 91 及び第 2 慣性体 92 の挙動が一つの遅れ要素に近付けられる。

[0072] 図 9 は、コントローラ 100 のハードウェア構成を例示するブロック図である。図 9 に示すように、コントローラ 100 は、回路 120 を有する。回路 120 は、一つ又は複数のプロセッサ 121 と、メモリ 122 と、ストレージ 123 と、ドライバ 124 と、入出力ポート 125 と、を含む。ストレージ 123 は、例えば不揮発性の半導体メモリ等、コンピュータによって読み取り可能な記憶媒体を有する。ストレージ 123 は、電機子 62 に対し、第 2 慣性体 92 の駆動力を制御目標に追従させるための駆動電力を出力することと、制御対象（例えばロボット 10）内で生じ第 2 慣性体 92 の動作に影響するフィードバック成分を打ち消す補償成分を制御対象の動作状態に基

づいて算出し、電機子 62 に出力する駆動電力に加算することと、をコントローラ 100 に実行させるプログラムを記憶している。例えばストレージ 123 は、上述したコントローラ 100 の機能ブロックを構成するためのプログラムを記憶している。

[0073] メモリ 122 は、ストレージ 123 の記憶媒体からロードしたプログラム及びプロセッサ 121 による演算結果を一時的に記憶する。プロセッサ 121 は、メモリ 122 と協働して上記プログラムを実行することで、コントローラ 100 の各機能ブロックを構成する。ドライバ 124 は、プロセッサ 121 からの指令に従って、モータ 60 を駆動する。入出力ポート 125 は、プロセッサ 121 からの指令に従って、速度センサ 70 及び加速度センサ 51, 52, 53, 54, 55, 56 との間で電気信号の入出力を行う。なお、回路 120 は、必ずしもプログラムにより各機能を構成するものに限られない。例えば回路 120 は、専用の論理回路又はこれを集積した ASIC (Application Specific Integrated Circuit) により少なくとも一部の機能を構成してもよい。

[0074] [応用例]

第 2 慣性体 92 の駆動力を制御目標に追従させる構成は、第 2 慣性体 92 の駆動力の制御を必要とする様々な制御に応用可能である。以下に応用例を示す。

[0075] 図 10 に示すコントローラ 101 は、第 2 慣性体 92 の駆動力を制御目標に追従させる構成を利用して、第 2 慣性体 92 の動作速度を制御する。例えばコントローラ 101 は、上述したコントローラ 100 に速度制御部 115 を付加したものである。

[0076] 図 11 に示すように、速度制御部 115 は、第 2 慣性体 92 の速度  $\omega_L$  の目標値である速度目標値  $\omega_{L\_ref}$  と、速度推定値  $\omega_{L\_ob}$  との偏差（以下、「速度偏差」という。）に応じた加速度目標値  $a_{L\_ref}$  を算出し、加速度制御部 111 に出力する。例えば加え合わせ点 AP61 で示されるように、速度制御部 115 は、速度目標値  $\omega_{L\_ref}$  から速度推定値  $\omega_{L\_ob}$  を減算して速度偏差

を算出する。

[0077] 伝達関数  $TF61$  で示されるように、速度制御部 115 は、速度偏差に速度ゲイン  $g_{vp}$  を乗算して加速度目標値  $a_{L\_ref}$  を算出する。速度ゲイン  $g_{vp}$  は予め設定された定数であり、コントローラ 100 が保持している。以上で速度制御部 115 による加速度目標値  $a_{L\_ref}$  の算出手順が完了する。加速度目標値  $a_{L\_ref}$  に加速度  $a_L$  を追従させる制御についてはコントローラ 100 と同様である。

[0078] 図 12 に示すコントローラ 102 は、第 2 慣性体 92 の駆動力を制御目標に追従させる構成を利用して、第 2 慣性体 92 の位置を制御する。例えばコントローラ 102 は、上述したコントローラ 101 に位置制御部 116 を付加したものである。

[0079] 図 13 に示すように、位置制御部 116 は、第 2 慣性体 92 の位置  $\theta_L$  の目標値である位置目標値  $\theta_{L\_ref}$  と、位置推定値  $\theta_{L\_ob}$  との偏差（以下、「位置偏差」という。）に応じた速度目標値  $\omega_{L\_ref}$  を算出し、速度制御部 115 に出力する。例えば加え合わせ点 AP62 で示されるように、位置制御部 116 は、第 2 慣性体 92 の位置目標値  $\theta_{L\_ref}$ （角度目標値）から第 2 慣性体 92 の位置推定値  $\theta_{L\_ob}$  を減算して位置偏差を算出する。位置推定値  $\theta_{L\_ob}$  は、例えば速度推定値  $\omega_{L\_ob}$  の積分により算出される。

[0080] 伝達関数  $TF62$  で示されるように、位置制御部 116 は、位置偏差に位置ゲイン  $g_{pp}$  を乗算して速度目標値  $\omega_{L\_ref}$  を算出する。位置ゲイン  $g_{pp}$  は予め設定された定数であり、コントローラ 100 が保持している。以上で位置制御部 116 による速度目標値  $\omega_{L\_ref}$  の算出手順が完了する。速度目標値  $\omega_{L\_ref}$  に速度  $\omega_L$  を追従させる制御についてはコントローラ 101 と同様である。

[0081] 図 14 に示すコントローラ 103 は、第 2 慣性体 92 の駆動力を制御目標に追従させる構成を利用して、第 2 慣性体 92 が外部環境に対して付与する力を制御する。例えばコントローラ 103 は、上述したコントローラ 100 の加速度制御部 111 を力制御部 117 に置き換えたものである。

[0082] 力制御部 117 は、第 2 慣性体 92 から外部環境に対して付与する外部トルク  $T_e$  をトルク目標値（制御目標）に近付けるように、第 1 慣性体 91 の駆動トルクの目標値を算出することを所定の制御周期で繰り返し実行する。

[0083] 図 15 は、第 1 慣性体 91、伝達要素 83 及び第 2 慣性体 92 に加えて、上記外部環境をモデル化して示すブロック線図である。図 15 において、外部環境は、弾性及び粘性を有するものとしてモデル化されている。すなわち図 15 においては、外部環境から第 2 慣性体 92 に弾性反発力及び粘性抵抗が作用する。

[0084] 例えば伝達関数  $TF71$ 、 $TF72$  で示されるように、外部環境においては、速度  $\omega_L$  を積分した変位角度に外部環境のばね定数  $K_E$  を乗算した大きさの弾性反発力が生じる。また、伝達関数  $TF73$  で示されるように、速度  $\omega_L$  に外部環境の粘性成分  $D_E$  を乗算した大きさの粘性抵抗が生じる。そして、加え合わせ点  $AP71$  で示されるように、上記弾性反発力と上記粘性抵抗とが加算された外部トルク  $T_e$  が第 2 慣性体 92 に伝わる。このため、加え合わせ点  $AP01$  で示されるように、第 2 慣性体 92 には、トルク  $T_e$  から外部トルク  $T_e$  を減算したトルク  $T_L$  が伝わる。

[0085] 図 16 に示すように、力制御部 117 は、第 2 慣性体 92 が外部環境に対して付与する力（上記外部トルク  $T_e$ ）のフィードバック値であるトルクフィードバック値  $T_{e\_fb}$  を算出し、外部トルク  $T_e$  の目標値であるトルク目標値  $T_{e\_ref}$  と上記トルクフィードバック値  $T_{e\_fb}$  との偏差（以下、「トルク偏差」という。）を算出する。

[0086] 例えば加え合わせ点  $AP64$  で示されるように、力制御部 117 は、外部トルク  $T_e$  の検出値であるトルク検出値  $T_{e\_sens}$  と、加速度  $a_L$  に応じた上記トルクフィードバック値  $T_{L\_fb}$  とを合算してトルクフィードバック値  $T_{e\_fb}$  を算出する。加え合わせ点  $AP65$  で示されるように、力制御部 117 は、トルク目標値  $T_{e\_ref}$  からトルクフィードバック値  $T_{e\_fb}$  を減算して上記トルク偏差を算出する。トルク偏差を縮小させるための制御手順はコントローラ 100 と同じである。

- [0087] なお、コントローラ 103 において、補償部 114 は、速度推定値  $\omega_{Lob}$  に粘性係数モデル値  $D_{Ln}$  を乗算して算出した粘性抵抗を加え合わせ点 AP65 でトルク目標値  $T_{eref}$  に加算する。
- [0088] 図 17 に示すコントローラ 104 は、第 2 慣性体 92 の駆動力を制御目標に追従させる構成を利用して、第 2 慣性体 92 の位置と、第 2 慣性体 92 が外部環境に対して付与する力とのハイブリッド制御を行う。例えばコントローラ 104 は、上述したコントローラ 100 の加速度制御部 111 をハイブリッド制御部 118 に置き換えたものである。
- [0089] ハイブリッド制御部 118 は、第 2 慣性体 92 の位置と、第 2 慣性体 92 が外部環境に付与する力との両方を制御目標に近付けるように第 1 慣性体 91 の駆動トルクの目標値を算出することを所定の制御周期で繰り返し実行する。
- [0090] 図 18 は、ハイブリッド制御部 118 が実行する第 1 慣性体 91 のトルク目標値の算出手順を例示するブロック線図である。上述したように、ロボット 10 は、アクチュエータ 41, 42, 43, 44, 45, 46 ごとに加速度センサを有するのに代えて、アクチュエータ 41, 42, 43, 44, 45, 46 のいずれによっても駆動される先端部 16 に加速度センサを有していてもよい。
- [0091] 図 18 は、先端部 16 の加速度センサ 57 及び力センサ 90 に基づいてアクチュエータ 41, 42, 43, 44, 45, 46 を制御する場合を例示している。図 18 において、先端部 16 の位置、速度、加速度及び力等は、いずれも直交 3 軸方向に沿う並進成分と、直交 3 軸まわりの回転成分との 6 成分を含む。
- [0092] 図 18 に示すように、ハイブリッド制御部 118 は、先端部 16 の位置のフィードバック値である位置フィードバック値  $P_{t\_fb}$  を算出し、先端部 16 の位置目標値  $P_{t\_ref}$  と位置フィードバック値  $P_{t\_fb}$  との偏差に応じた先端部 16 の速度目標値  $V_{t\_ref}$  を算出する。
- [0093] 例えばハイブリッド制御部 118 は、伝達関数  $TF81$ ,  $TF82$  で示さ

れるように、関節 31, 32, 33, 34, 35, 36 の速度推定値  $\omega_{L\_ob}$  を積分し、積分結果に順運動学演算を施して位置フィードバック値  $P_{t\_fb}$  を算出する。ハイブリッド制御部 118 は、加え合わせ点 AP81 で示されるように、位置目標値  $P_{t\_ref}$  から位置フィードバック値  $P_{t\_fb}$  を減算して偏差（以下、「位置偏差」という。）を算出する。伝達関数 TF83 で示されるように、ハイブリッド制御部 118 は、位置偏差に位置ゲイン  $g_{pp}$  を乗算して速度目標値  $V_{t\_ref}$  を算出する。位置ゲイン  $g_{pp}$  は予め設定された定数であり、コントローラ 100 が保持している。

[0094] ハイブリッド制御部 118 は、先端部 16 の速度のフィードバック値である速度フィードバック値  $V_{t\_fb}$  を算出し、先端部 16 の速度目標値  $V_{t\_ref}$  と速度フィードバック値  $V_{t\_fb}$  との偏差に応じた先端部 16 の加速度目標値  $a_{t\_ref}$  を算出する。

[0095] 例えばハイブリッド制御部 118 は、伝達関数 TF84 で示されるように、関節 31, 32, 33, 34, 35, 36 の速度推定値  $\omega_{L\_ob}$  に所定の変換行列  $J$  を乗算して先端部 16 の速度フィードバック値  $V_{t\_fb}$  を算出する。ハイブリッド制御部 118 は、加え合わせ点 AP82 で示されるように、速度目標値  $V_{t\_ref}$  から速度フィードバック値  $V_{t\_fb}$  を減算して偏差（以下、「速度偏差」という。）を算出する。伝達関数 TF85 で示されるように、ハイブリッド制御部 118 は、速度偏差に速度ゲイン  $g_{vp}$  を乗算して加速度目標値  $a_{t\_ref}$  を算出する。速度ゲイン  $g_{vp}$  は予め設定された定数であり、コントローラ 100 が保持している。

[0096] 次に、ハイブリッド制御部 118 は、加速度目標値  $a_{t\_ref}$  に基づいて、第 2 慣性体 92 の位置を制御するための駆動トルクの目標値であるトルク目標値  $T_{L\_ref}$  をアクチュエータ 41, 42, 43, 44, 45, 46 ごとに算出する。

[0097] 例えばハイブリッド制御部 118 は、伝達関数 TF86 で示されるように、加速度目標値  $a_{t\_ref}$  に逆変換行列  $J^{-1}$  を乗算してアクチュエータ 41, 42, 43, 44, 45, 46 ごとの加速度目標値  $a_{L\_ref}$  を算出する。この

際に、ハイブリッド制御部 118 は、加速度目標値  $a_{t\_ref}$  に選択行列  $S$  を更に乗算してもよい。選択行列  $S$  は、第 2 慣性体 92 の位置の制御方向の成分を抽出するための行列であり、コントローラ 100 が保持している。更にハイブリッド制御部 118 は、伝達関数  $TF87$  で示されるように、加速度目標値  $a_{L\_ref}$  にイナーシャモデル値  $J_{Ln}$  を乗算してトルク目標値  $T_{L\_ref}$  を算出する。

[0098] また、ハイブリッド制御部 118 は、第 2 慣性体 92 が外部環境に付与する力を制御するためのトルク目標値  $T_{e\_ref}$  を算出する。例えばハイブリッド制御部 118 は、伝達関数  $TF88$  で示されるように、先端部 16 が外部環境に付与する力の目標値である力目標値  $F_{t\_ref}$  に変換行列  $J^T$  を乗算してアクチュエータ 41, 42, 43, 44, 45, 46 ごとのトルク目標値  $T_{e\_ref}$  を算出する。この際に、ハイブリッド制御部 118 は、力目標値  $F_{t\_ref}$  に選択行列  $I-S$  を更に乗算してもよい。選択行列  $I-S$  は、第 2 慣性体 92 が外部環境に付与する力の制御方向の成分を抽出するための行列であり、コントローラ 100 が保持している。

[0099] このように、第 2 慣性体 92 の位置を制御するためのトルク目標値  $T_{L\_ref}$  と、第 2 慣性体 92 が外部環境に付与する力を制御するためのトルク目標値  $T_{e\_ref}$  とを算出した後、ハイブリッド制御部 118 は、加え合わせ点  $AP83$  で示されるようにこれらを合算してトルク目標値  $T_{s\_ref}$  を算出する。トルク目標値  $T_{s\_ref}$  は、伝達要素 83 から第 2 慣性体 92 に伝わるトルクの目標値である。

[0100] ハイブリッド制御部 118 は、伝達要素 83 から第 2 慣性体 92 に伝わるトルクのフィードバック値であるトルクフィードバック値  $T_{s\_fb}$  を算出し、上記トルク目標値  $T_{s\_ref}$  とトルクフィードバック値  $T_{s\_fb}$  との偏差（以下、「トルク偏差」という。）を算出する。

[0101] 例えば伝達関数  $TF91$ ,  $TF92$  で示されるように、ハイブリッド制御部 118 は、先端部 16 の加速度検出値  $a_{t\_sens}$  に逆変換行列  $J^{-1}$  を乗算し、更にこれにイナーシャモデル値  $J_{Ln}$  を乗算してトルクフィードバック値  $T_L$

$T_{fb}$ を算出する。また、伝達関数 $TF_{93}$ で示されるように、ハイブリッド制御部118は、先端部16が外部環境に付与する力の検出値である力検出値 $F_{t\_sens}$ に変換行列 $J^T$ を乗算してトルクフィードバック値 $T_{e\_fb}$ を算出する。この際に、ハイブリッド制御部118は、力検出値 $F_{t\_sens}$ に上述した選択行列 $I-S$ を更に乗算してもよい。

[0102] その後ハイブリッド制御部118は、加え合わせ点AP84で示されるように、トルクフィードバック値 $T_{L\_fb}$ とトルクフィードバック値 $T_{e\_fb}$ とを合算してトルクフィードバック値 $T_{s\_fb}$ を算出する。

[0103] 次に、ハイブリッド制御部118は、加え合わせ点AP85で示されるように、トルク目標値 $T_{s\_ref}$ からトルクフィードバック値 $T_{s\_fb}$ を減算してトルク偏差を算出する。トルク偏差を縮小させるための制御手順はコントローラ100と同じである。

[0104] なお、コントローラ104において、補償部114は、速度推定値 $\omega_{L\_ob}$ に粘性係数モデル値 $D_{Ln}$ を乗算して算出した粘性抵抗を加え合わせ点AP85でトルク目標値 $T_{s\_ref}$ に加算する。

[0105] [本実施形態の効果]

以上に説明したように、コントローラ100は、第1慣性体91と、電力の供給に応じて第1慣性体91を駆動する電機子62と、第2慣性体92と、第1慣性体91から第2慣性体92に動力を伝達する伝達要素83とを有する制御対象の電機子62に対し、第2慣性体92の駆動力を制御目標に追従させるための駆動電力を出力する電流制御部112と、制御対象内で生じ第2慣性体92の動作に影響するフィードバック成分を打ち消す補償成分を制御対象の動作状態に基づいて算出し、電流制御部112が電機子62に出力する駆動電力に加算する補償部114と、を備える。

[0106] 制御対象内で生じるフィードバック成分が打ち消されることで、第1慣性体91及び第2慣性体92の挙動が一つの遅れ要素に近付けられる。これにより、第1慣性体91と第2慣性体92との間に生じる振動が抑制されるので、制御目標に対する第2慣性体92の駆動力の追従性が向上する。従って

、制御の安定性向上に有効である。

[0107] 補償部 114 は、伝達要素 83 から第 1 慣性体 91 に入力されるフィードバック成分を打ち消す第 1 補償成分と、第 2 慣性体 92 から伝達要素 83 に入力されるフィードバック成分を打ち消す第 2 補償成分とを制御対象の動作状態に基づいて算出し、電流制御部 112 が電機子 62 に出力する駆動電力に加算してもよい。この場合、第 1 慣性体 91 と第 2 慣性体 92 との間に生じる振動がより確実に抑制される。

[0108] 補償部 114 は、伝達要素 83 から第 1 慣性体 91 に入力される反力を打ち消すように第 1 補償成分を算出し、第 2 慣性体 92 から伝達要素 83 に入力される第 2 慣性体 92 の動作速度を打ち消すように第 2 補償成分を算出してもよい。

[0109] 補償部 114 は、第 2 慣性体 92 の加速度に相関する物理量の同時点の検出値に基づいて第 1 補償成分及び第 2 補償成分を算出してもよい。この場合、第 1 補償成分及び第 2 補償成分の位相ずれが抑制される。このため、第 1 慣性体 91 と第 2 慣性体 92 との間に生じる振動がより確実に抑制される。

[0110] 補償部 114 は、第 1 補償成分及び第 2 補償成分の少なくとも一方を瞬時状態オブザーバ 113 により算出してもよい。この場合、第 1 補償成分及び第 2 補償成分を容易に導出することができる。

[0111] 以上、実施形態について説明したが、本開示は必ずしも上述した実施形態に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲で様々な変更が可能である。例えば、上述の実施形態では、ロボットが制御対象であるロボットシステムを例示したがこれに限られない。本開示の制御装置は、第 1 慣性体と、電力の供給に応じて第 1 慣性体を駆動する電機子と、第 2 慣性体と、第 1 慣性体から第 2 慣性体に動力を伝達する伝達要素とを有するあらゆる制御対象の制御において、第 2 慣性体の駆動力の追従性を向上させるのに有効である。

## 符号の説明

[0112] 1…ロボットシステム、10…ロボット、62…電機子、83…伝達要素

、 9 1 …第 1 慣性体、 9 2 …第 2 慣性体、 1 0 0, 1 0 1, 1 0 2, 1 0 3  
、 1 0 4 …コントローラ（制御装置）、 1 1 2 …電流制御部（制御部）、 1  
1 3 …瞬時状態オブザーバ、 1 1 4 …補償部。

## 請求の範囲

- [請求項1] 第1慣性体と、電力の供給に応じて前記第1慣性体を駆動する電機子と、第2慣性体と、前記第1慣性体から前記第2慣性体に動力を伝達する伝達要素とを有する制御対象の前記電機子に対し、前記第2慣性体の駆動力を制御目標に追従させるための駆動電力を出力する制御部と、
- 前記制御対象内で生じ前記第2慣性体の動作に影響するフィードバック成分を打ち消す補償成分を前記制御対象の動作状態に基づいて算出し、前記制御部が前記電機子に出力する前記駆動電力に加算する補償部と、を備える制御装置。
- [請求項2] 前記補償部は、前記伝達要素から前記第1慣性体に入力されるフィードバック成分を打ち消す第1補償成分と、前記第2慣性体から前記伝達要素に入力されるフィードバック成分を打ち消す第2補償成分とを前記制御対象の動作状態に基づいて算出し、前記制御部が前記電機子に出力する前記駆動電力に加算する、請求項1記載の制御装置。
- [請求項3] 前記補償部は、前記伝達要素から前記第1慣性体に入力される反力を打ち消すように前記第1補償成分を算出し、前記第2慣性体から前記伝達要素に入力される前記第2慣性体の動作速度を打ち消すように前記第2補償成分を算出する、請求項2記載の制御装置。
- [請求項4] 前記補償部は、前記第2慣性体の加速度に相関する物理量の同時点の検出値に基づいて前記第1補償成分及び前記第2補償成分を算出する、請求項2又は3記載の制御装置。
- [請求項5] 前記補償部は、前記第1補償成分及び前記第2補償成分の少なくとも一方を瞬時状態オブザーバにより算出する、請求項4記載の制御装置。
- [請求項6] 第1慣性体と、電力の供給に応じて前記第1慣性体を駆動する電機子と、第2慣性体と、前記第1慣性体から前記第2慣性体に動力を伝達する伝達要素とを有する制御対象の前記電機子に対し、前記第2慣

性体の駆動力を制御目標に追従させるための駆動電力を出力することと、

前記制御対象内で生じ前記第2慣性体の動作に影響するフィードバック成分を打ち消す補償成分を前記制御対象の動作状態に基づいて算出し、前記電機子に出力する前記駆動電力に加算することと、を備える制御方法。

[請求項7] 前記伝達要素から前記第1慣性体に入力されるフィードバック成分を打ち消す第1補償成分と、前記第2慣性体から前記伝達要素に入力されるフィードバック成分を打ち消す第2補償成分とを前記制御対象の動作状態に基づいて算出し、前記電機子に出力する前記駆動電力に加算する、請求項6記載の制御方法。

[請求項8] 前記伝達要素から前記第1慣性体に入力される反力を打ち消すように前記第1補償成分を算出し、前記第2慣性体から前記伝達要素に入力される前記第2慣性体の動作速度を打ち消すように前記第2補償成分を算出する、請求項7記載の制御方法。

[請求項9] 前記第2慣性体の加速度に相関する物理量の同時点の検出値に基づいて前記第1補償成分及び前記第2補償成分を算出する、請求項7又は8記載の制御方法。

[請求項10] 前記第1補償成分及び前記第2補償成分の少なくとも一方を瞬時状態オブザーバにより算出する、請求項7記載の制御方法。

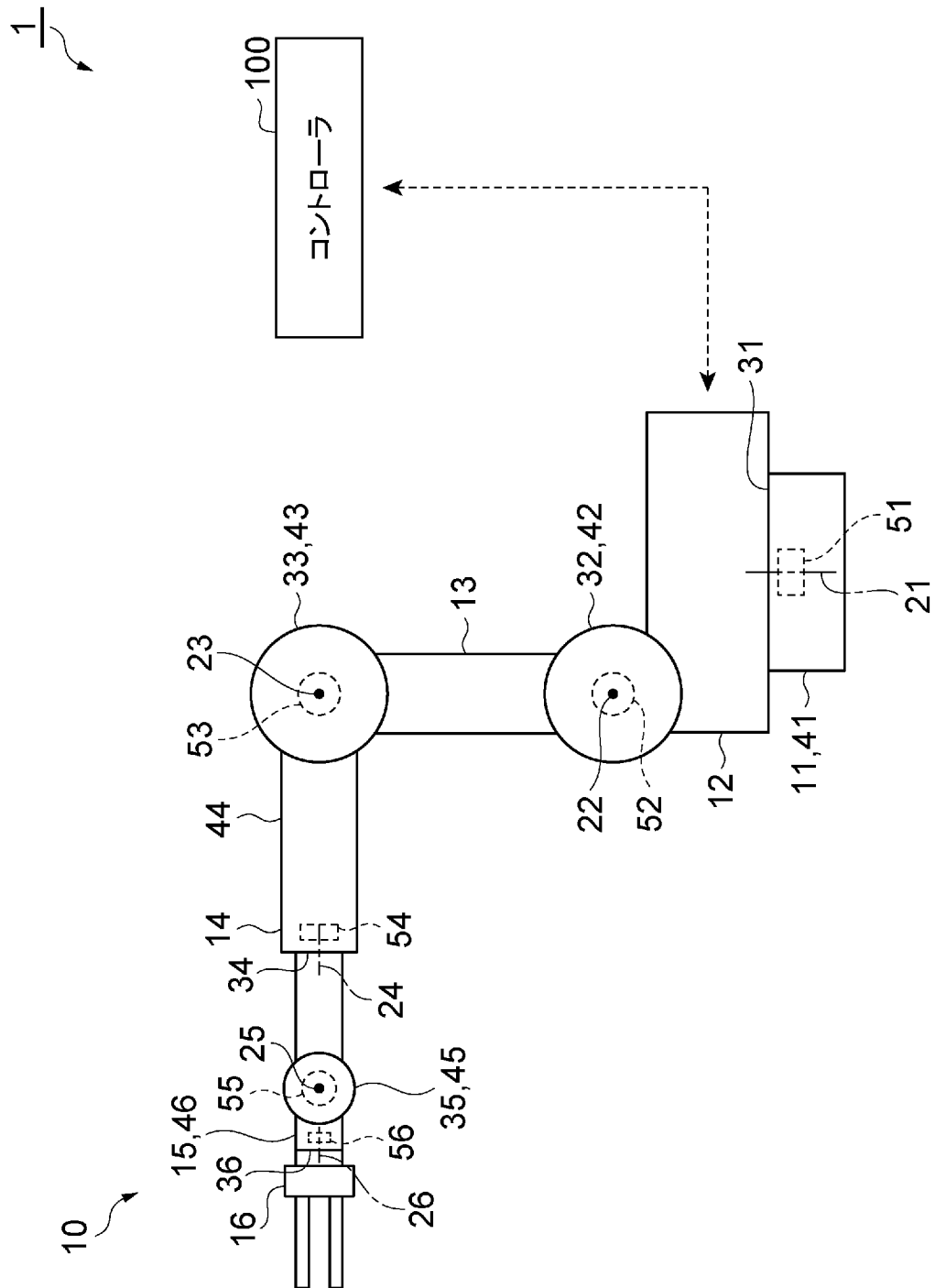
[請求項11] 第1慣性体と、電力の供給に応じて前記第1慣性体を駆動する電機子と、第2慣性体と、前記第1慣性体から前記第2慣性体に動力を伝達する伝達要素とを有するロボットと、

前記第2慣性体の加速度を目標加速度に追従させるための駆動電力を出力する制御部と、

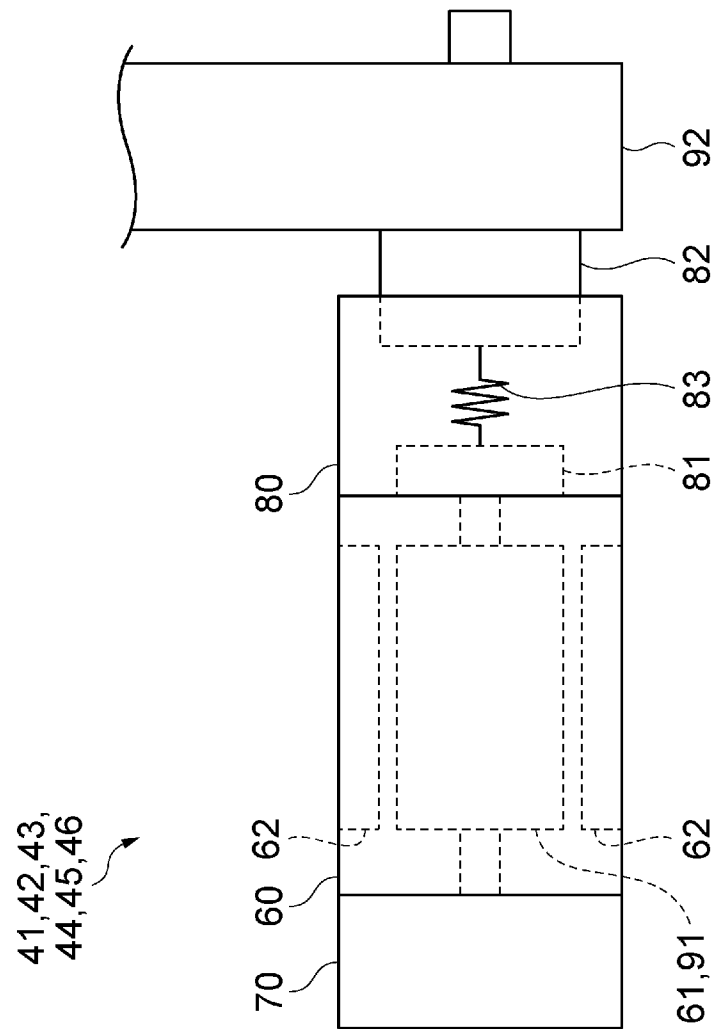
前記ロボット内で生じ前記第2慣性体の動作に影響するフィードバック成分を打ち消す補償成分を前記ロボットの動作状態に基づいて算出し、前記制御部が前記電機子に出力する前記駆動電力に加算する補

償部と、を備えるロボットシステム。

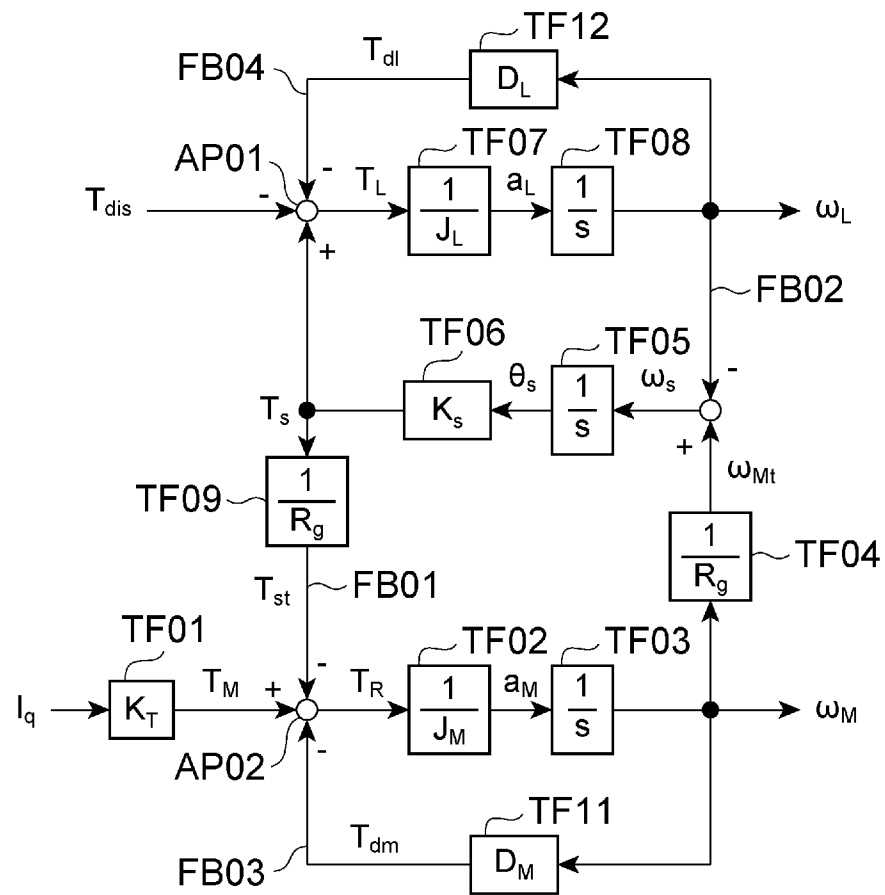
[図1]



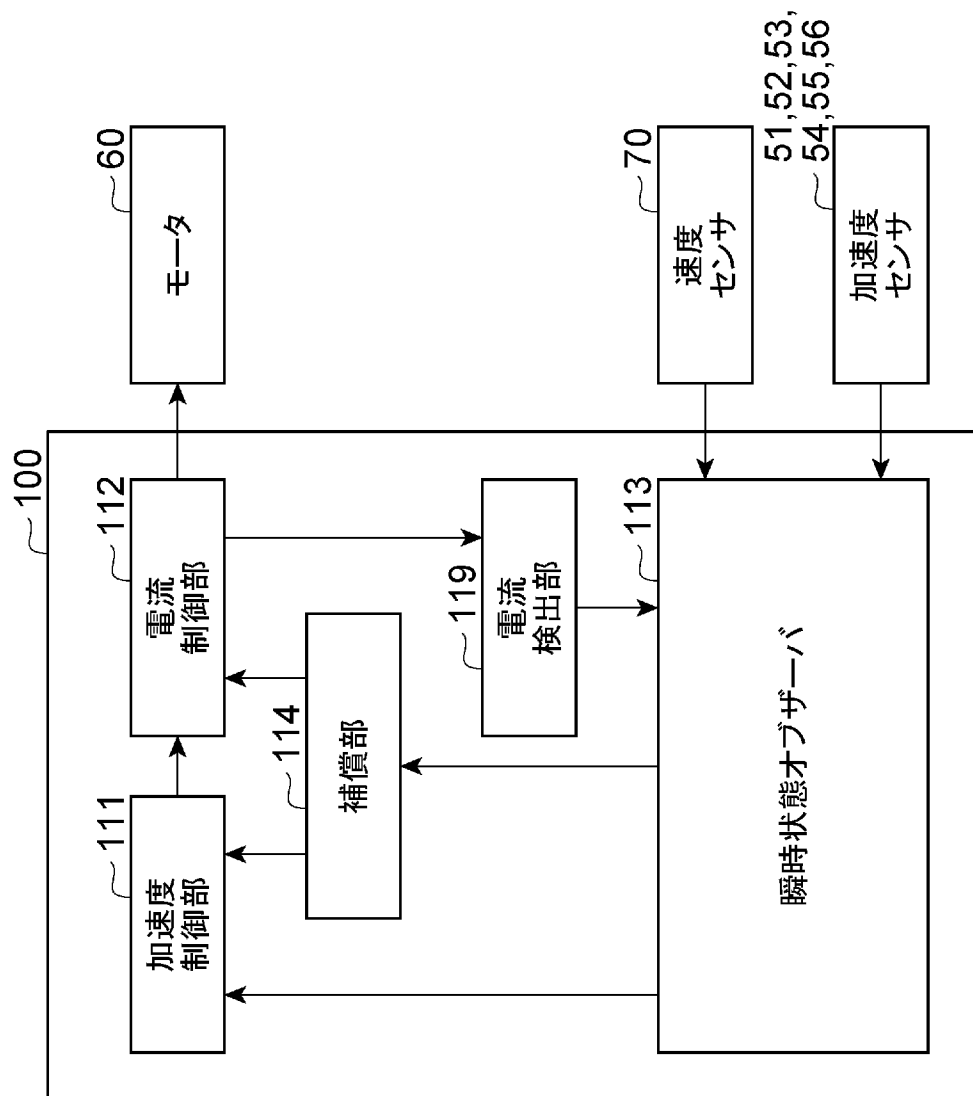
[図2]



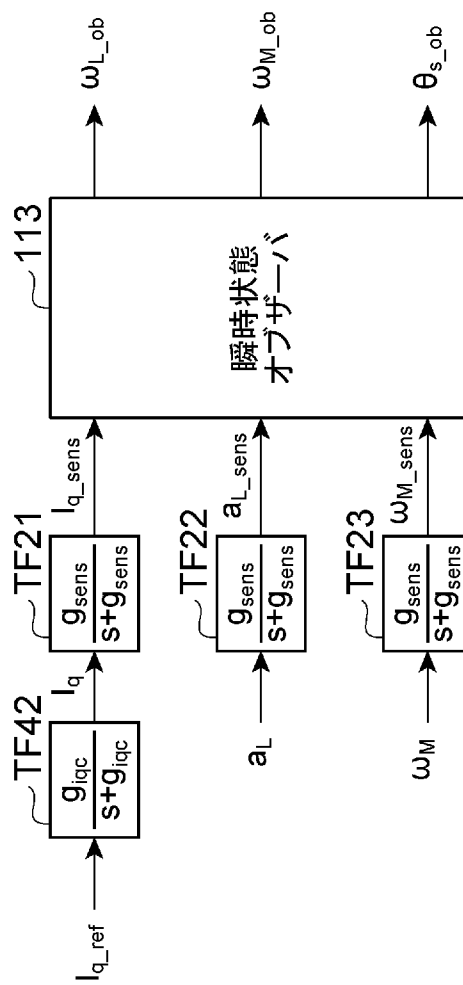
[図3]



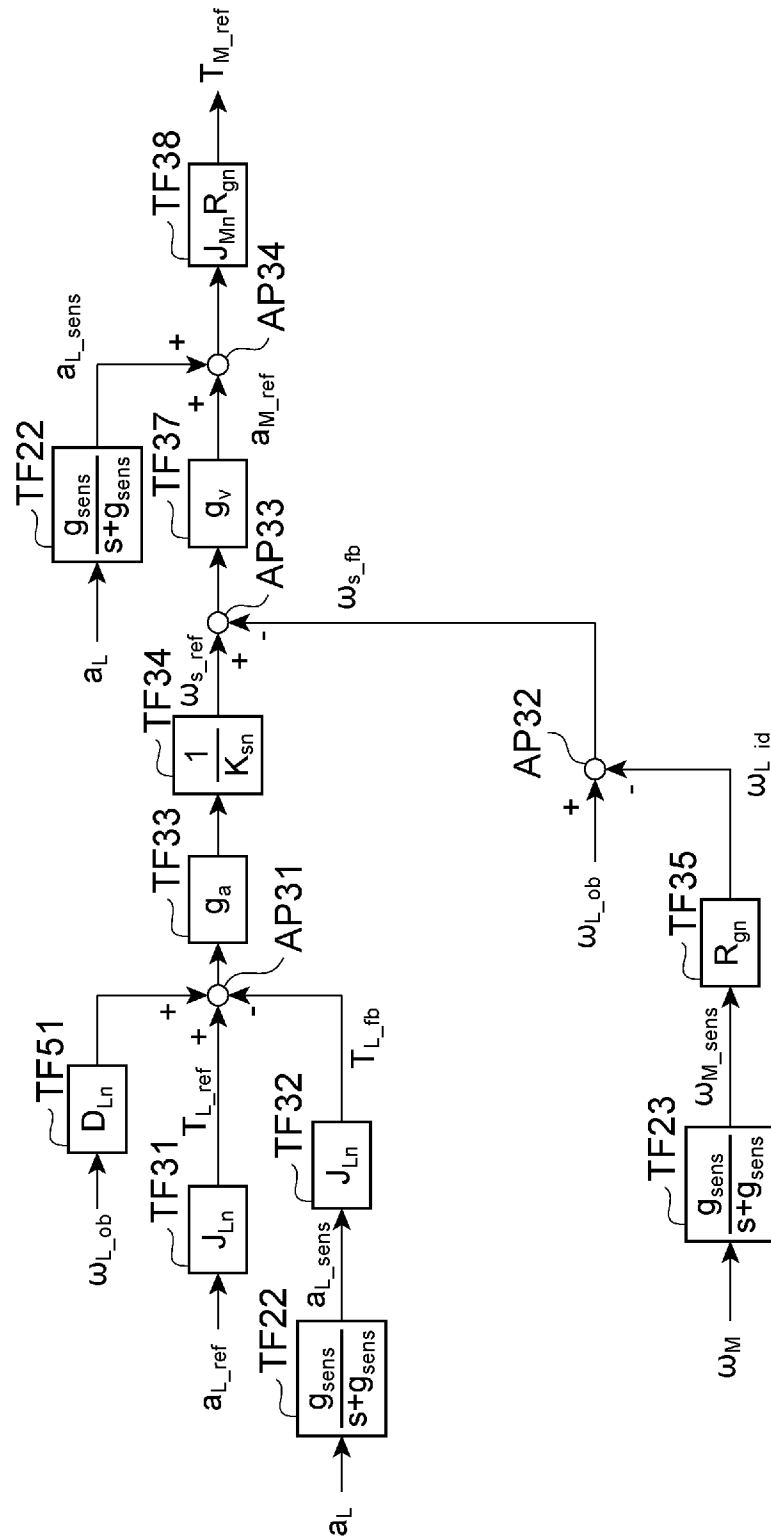
[図4]



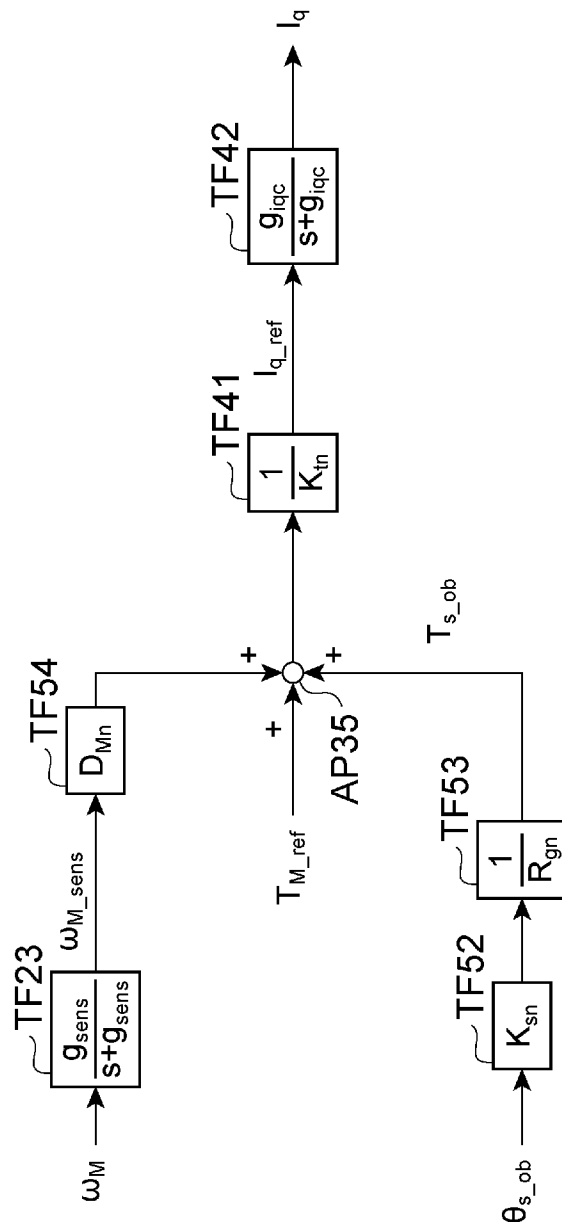
[図5]



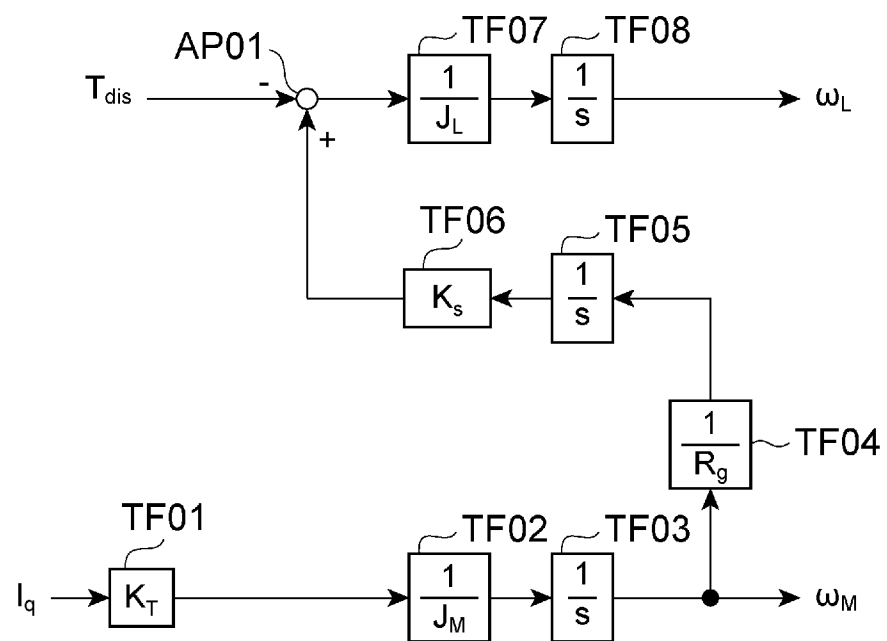
[図6]



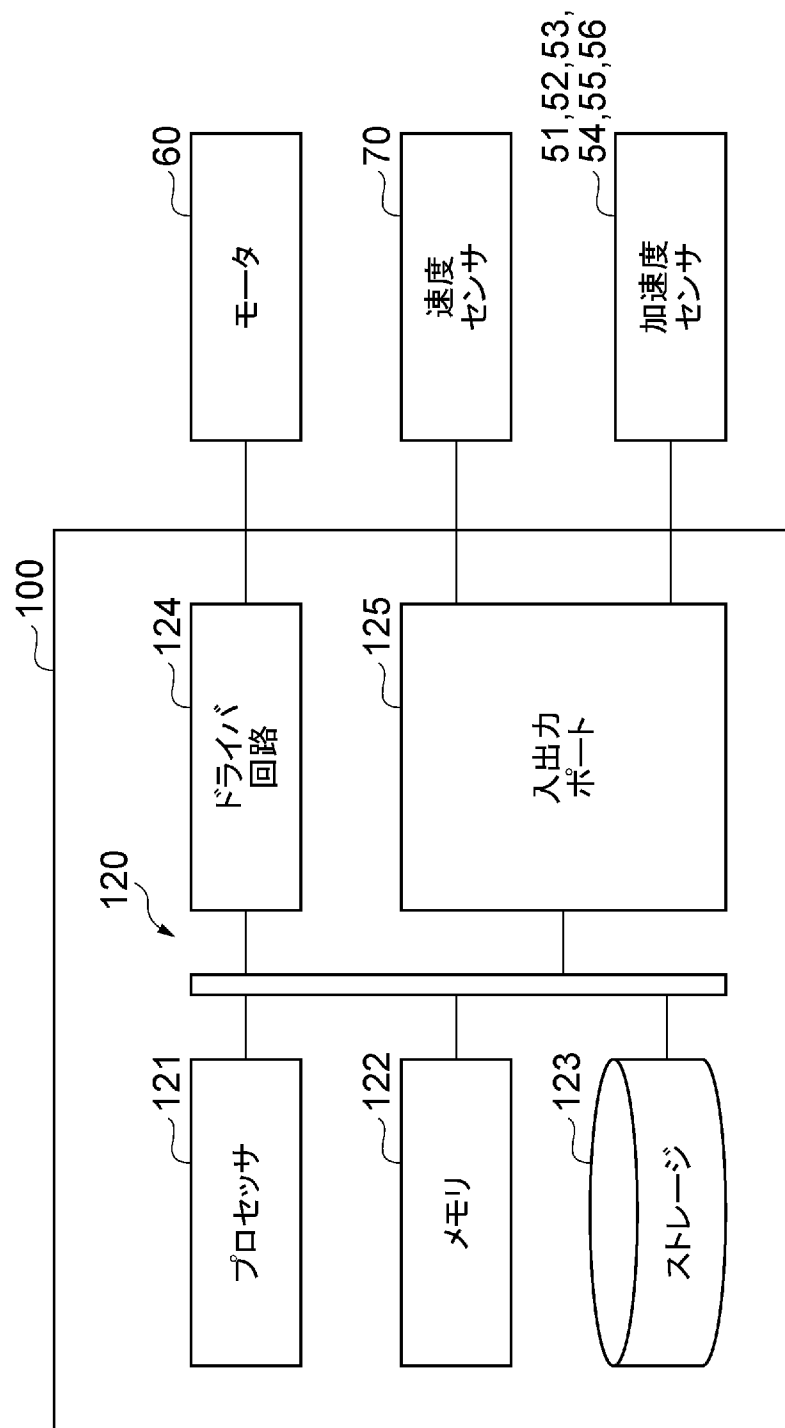
[図7]



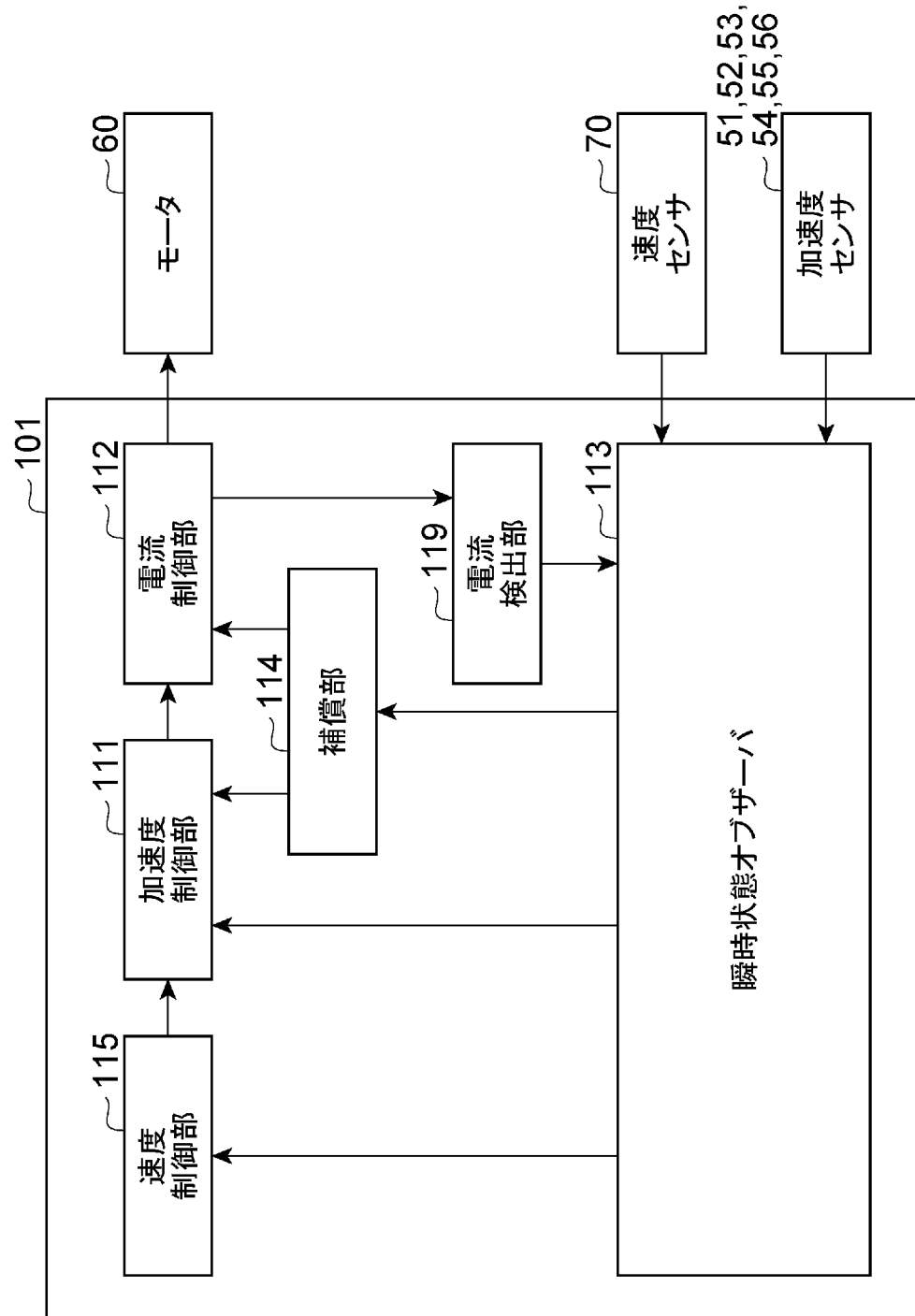
[図8]



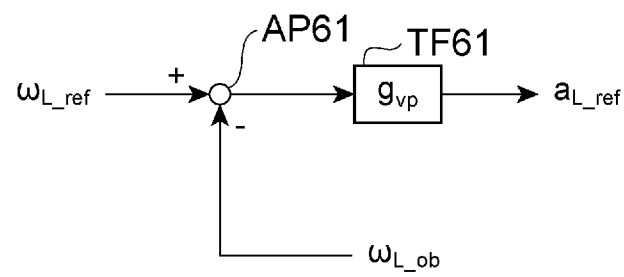
[図9]



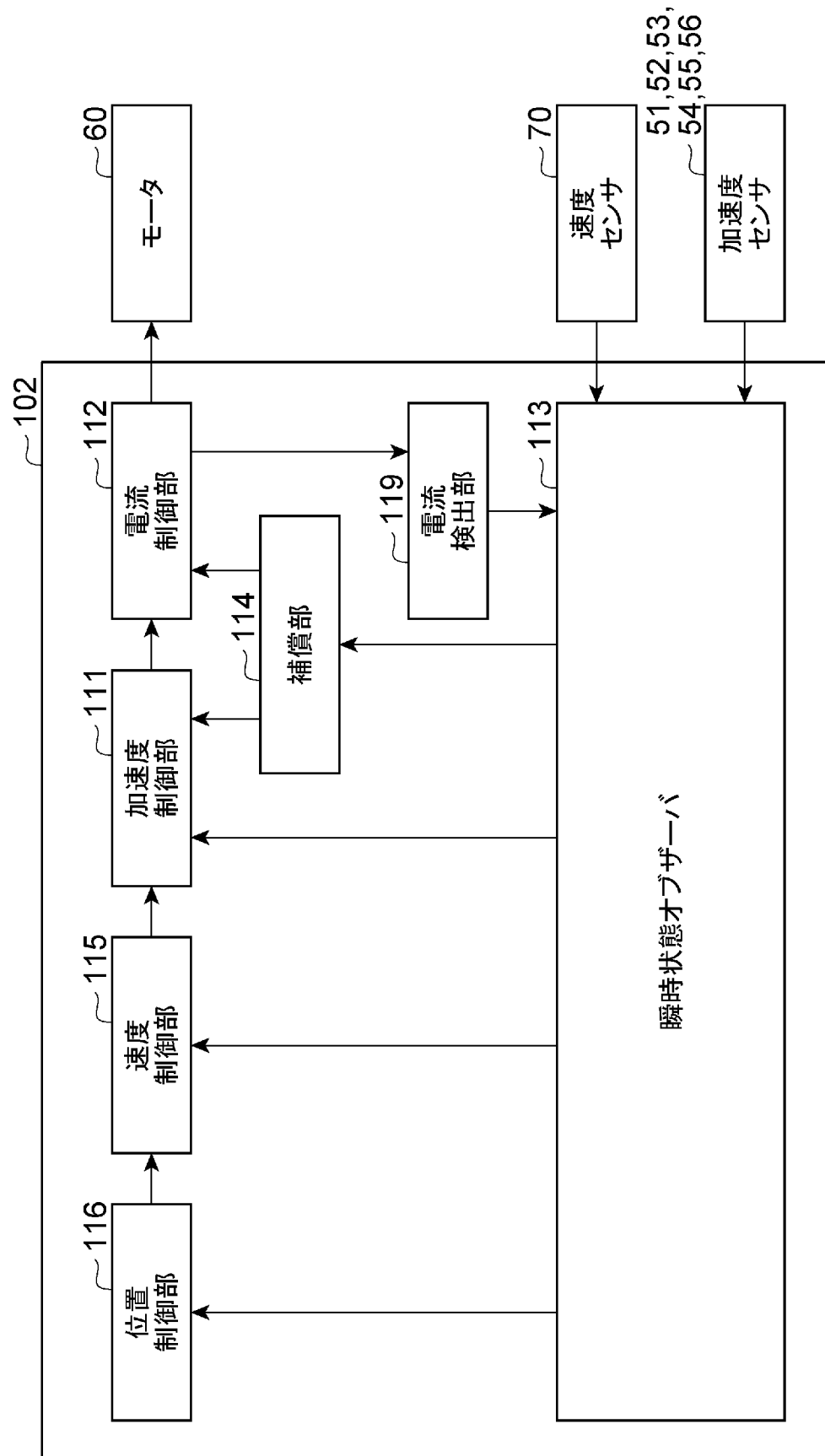
[図10]



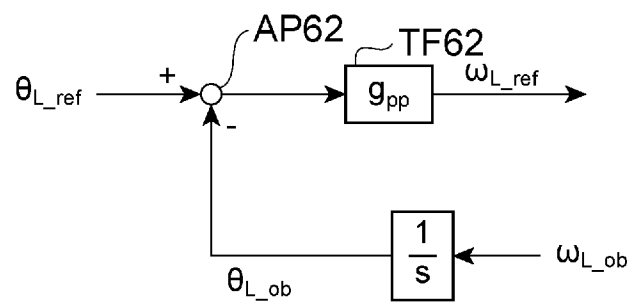
[図11]



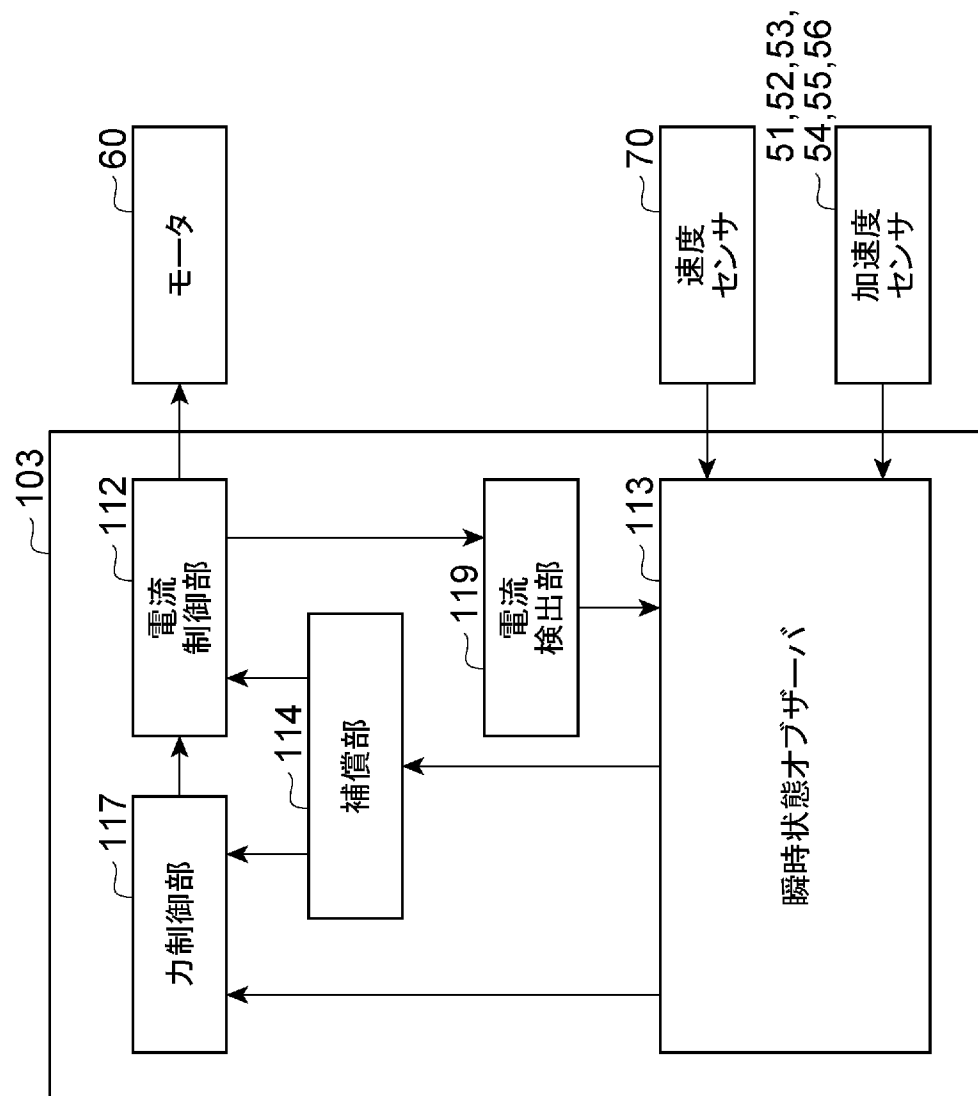
[図12]



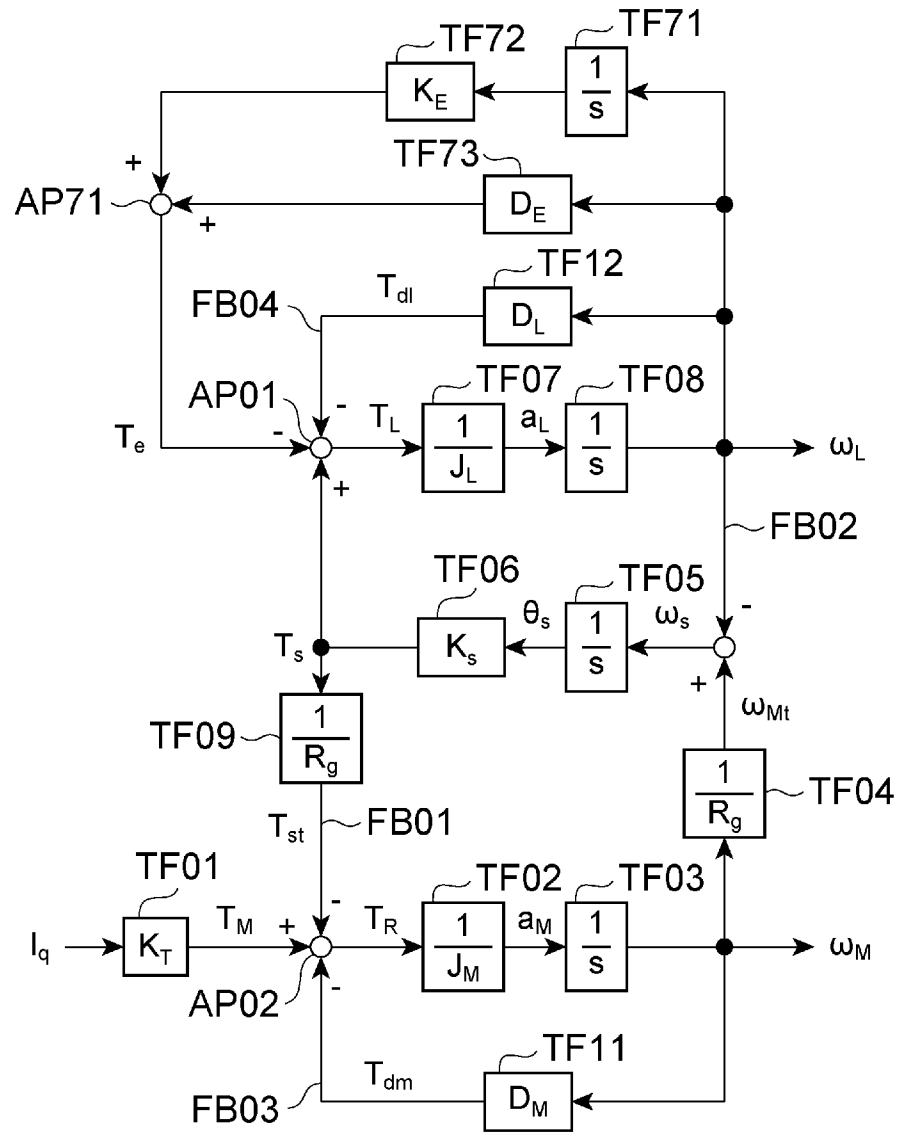
[図13]



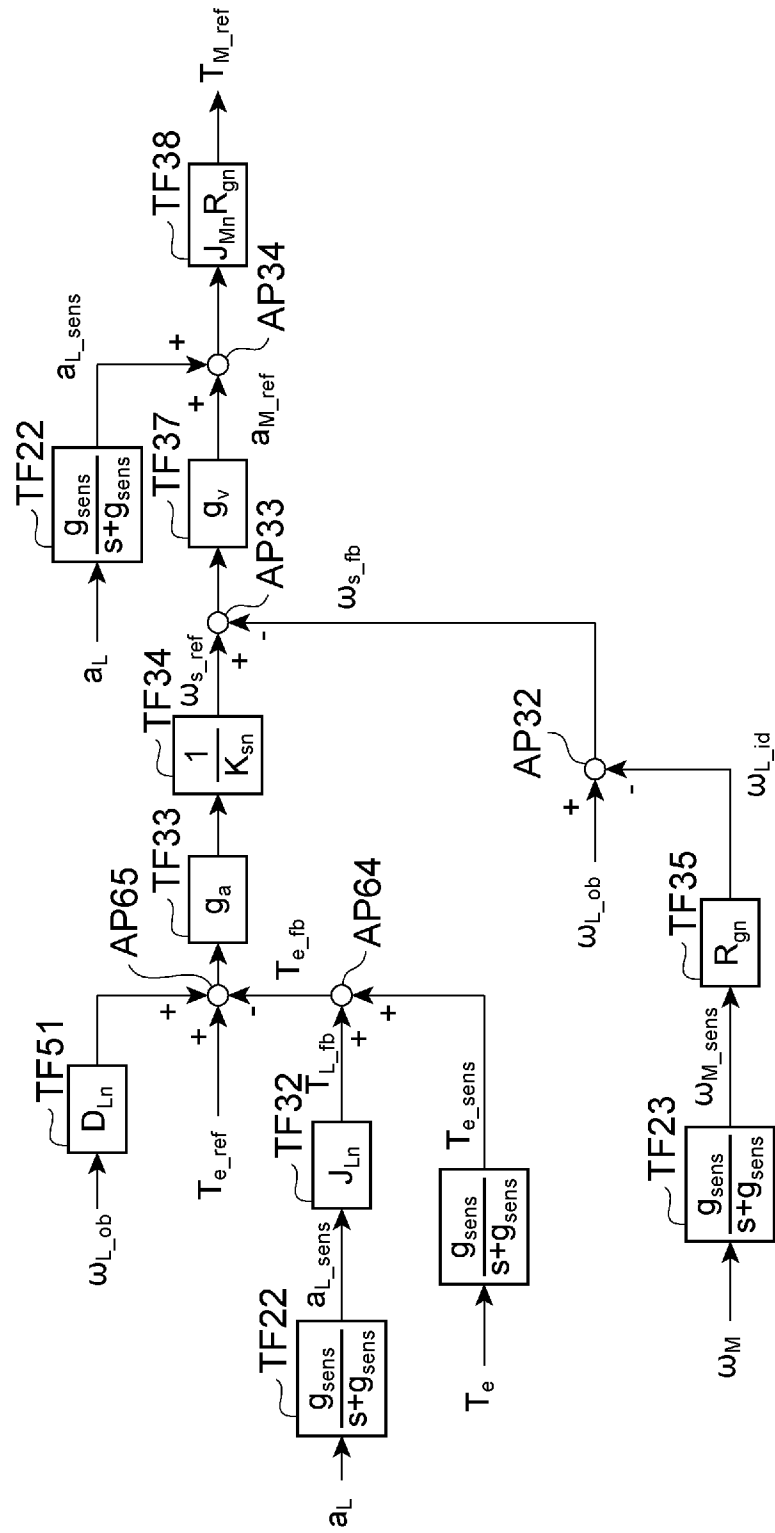
[図14]



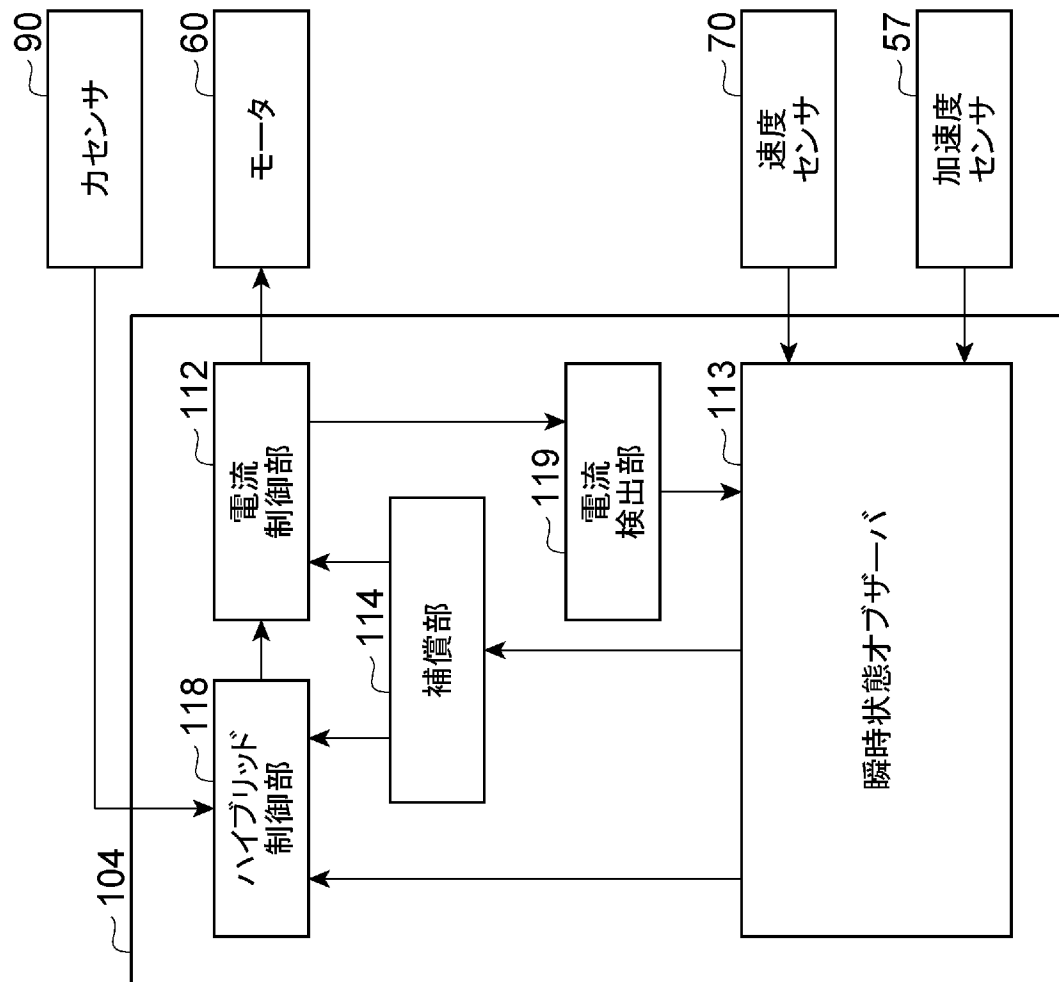
[図15]



[図16]



[図17]



The diagram illustrates a control system for a two-link manipulator. It features several interconnected blocks and feedback loops:

- Reference Inputs:**  $P_{t\_ref}$ ,  $P_{t\_fb}$ , and  $\omega_{M\_ref}$ .
- Position Control Loop:**  $P_{t\_ref}$  is compared with  $P_{t\_fb}$  (summing junction AP81). The error signal passes through gain  $g_{pp}$  (TF83) and is fed into the Kinematics block (TF82). The Kinematics block outputs  $\omega_{L\_ob}$ , which is integrated by block  $J$  (TF84) to produce  $V_{t\_fb}$ .  $V_{t\_fb}$  is subtracted from  $V_{t\_ref}$  (summing junction AP82) and then passed through gain  $g_{vp}$  (TF85) to produce  $a_{t\_ref}$ .  $a_{t\_ref}$  is integrated by block  $J^{-1}S$  (TF86) to produce  $T_{L\_ref}$ , which is added to  $T_{e\_ref}$  (summing junction AP83) to produce  $T_{s\_ref}$ .  $T_{s\_ref}$  is then passed through block  $J^T(I-S)$  (TF88) to produce  $F_{t\_ref}$ .
- Force Control Loop:**  $F_{t\_ref}$  is compared with  $F_t$  (summing junction AP84). The error signal passes through gain  $g_a$  (TF33) and is fed into block  $\frac{1}{K_{sn}}$  (TF34). The output of this block is added to  $a_L$  (summing junction AP33) to produce  $a_L$ .  $a_L$  is then passed through block  $\frac{g_{sens}}{s+g_{sens}}$  (TF22) to produce  $T_{M\_ref}$ .
- Motor Reference:**  $\omega_{M\_ref}$  is compared with  $\omega_{M\_sens}$  (summing junction AP32). The error signal passes through gain  $g_{gn}$  (TF35) to produce  $\omega_{L\_ob}$ , which is fed back to the Kinematics block.
- Feedback Loops:** The diagram includes several feedback loops for position, velocity, and acceleration, ensuring accurate tracking of the reference signals.

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/021796

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl. B25J13/00 (2006.01) i, H02P29/40 (2016.01) 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)

Int.Cl. B25J13/00, H02P29/40

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

|                                                          |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| Published examined utility model applications of Japan   | 1922-1996 |
| Published unexamined utility model applications of Japan | 1971-2019 |
| Registered utility model specifications of Japan         | 1996-2019 |
| Published registered utility model applications of Japan | 1994-2019 |

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 2008-228484 A (NAGAOKA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 25 September 2008, paragraphs [0036]-[0061], fig. 1-3 (Family: none) | 1, 6, 11              |
| Y         | JP 2017-34936 A (NAGAOKA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 09 February 2017, paragraphs [0013]-[0015], fig. 1 (Family: none)     | 1, 6, 11              |
| A         | JP 2011-186669 A (NIIGATA MACHINE TECHNO CO., LTD.) 22 September 2011, entire text, all drawings (Family: none)          | 1-11                  |

☐ 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  
14 August 2019 (14.08.2019)

Date of mailing of the international search report  
27 August 2019 (27.08.2019)

Name and mailing address of the ISA/  
Japan Patent Office  
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,  
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

## 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, H02P29/40(2016.01)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, H02P29/40

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 | 1971-2019年 |
| 日本国実用新案登録公報 | 1996-2019年 |
| 日本国登録実用新案公報 | 1994-2019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<br>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<br>請求項の番号 |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Y               | JP 2008-228484 A（国立大学法人長岡技術科学大学）2008.09.25, 段落【0036】-【0061】、【図1】-【図3】（ファミリーなし） | 1, 6, 11       |
| Y               | JP 2017-34936 A（国立大学法人長岡技術科学大学）2017.02.09, 段落【0013】-【0015】、【図1】（ファミリーなし）       | 1, 6, 11       |
| A               | JP 2011-186669 A（株式会社ニイガタマシントクノ）2011.09.22, 全文、全図（ファミリーなし）                     | 1-11           |

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。

## \* 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

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

国際調査を完了した日

14.08.2019

国際調査報告の発送日

27.08.2019

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）

武市 匡紘

3U

4414

電話番号 03-3581-1101 内線 3364