

IDCS を用いた柔軟アームを有するロボットの振動制御

IDCS based controller for industrial robots with a flexible arm

ベンチャー研究室 青木 健悟 Kengo Aoki

We propose a fast and stable motion controller for a robot with a flexible arm using IDCS control scheme. The IDCS controller scheme, corresponds to a numerical computation of the inverse dynamics of the systems, allows stable high performance control even when the system model is inaccuracy. We applied IDCS with Dual Model Matching(DMM) controller to the lift table and consider the reference tracking of IDCS with reduction of the vibration of the flexible arm. We can get good simulation model of the robot for the IDCS in real time by estimating inertial parameters using generalized coordinates of the baselink, the joint angles and the external forces information.

Key Words: Dynamics, High performance controller, Identification

1. 緒言

ロボットシステムは産業や医療などの様々な場面に広く普及し、工場の生産性、医療現場の安全性を向上させるために更なる自立化、高速化、動きの複雑化が求められている。一般にこれらのロボットは複雑な機構を有しているが、PID 制御器などの簡単なフィードバック制御が適用されている場合が多くある。フィードバック制御を用いる目的としては、制御対象の安定化、及び良好な目標値追従性能を実現するといったことが挙げられる。しかし、これらの制御器を搭載したロボットシステムでは応答性を向上させるために制御ゲインを大きくすると、システムが不安定になりやすいという問題がある。そこで、ロボットを安定かつ高速に制御できる制御手法が求められている [1]。

本研究では、Inverse Dynamics Compensation via 'Simulation of feedback control systems'(IDCS)制御手法を実在する産業用ロボットの制御に適用し、安定かつ高速に制御することで、IDCS 制御手法の有効性を検討することを目的とする [2] [3]。先行研究で、IDCS はシミュレーション上において PID 制御器と比較して安定かつ高速な制御を実現することができた。しかし、PID 制御器を用いた IDCS では、PID 制御器が振動抑制に適していないために、振動抑制に関して良好な結果が得られなかった [4]。よって今回は IDCS 内の制御器に振動抑制に適した Dual Model Matching(DMM)制御器 [5] [6]を用いて、柔軟アームの振動を抑制しながら高速かつ安定に制御することで、IDCS 制御手法の振動抑制に対する有効性を検討する。

また、IDCS 制御手法を含め、モデルベース制御手法は簡単なフィードバック制御と比較して高い制御性能を持つが、制御性能はロボットシステムのモデルの精度に依存する。一般的にロボットシステムのモデル化を行う際には、設計段階における CAD データから設定された力学パラメータが用いられることが多い。しかし、リンクの重量、重心、慣性テンソルなどの力学パラメータは、設計時に CAD から計算することができるが、モータの細部にわたっての CAD は用いられていないことが多くあり、実システムとの間に誤差が生じることが考えられる。また、ケーブルなどの電装系も含めた力学パラメータの算出は設計段階における CAD から算出することは困難である。

さらに、産業用ロボットなどのロボットシステムは、物の運搬などを行うために、質量などの力学パラメータが動作によって逐次変化すると考えられる。よって、モデルベース制御手法の制御性能を最大限利用するために、設計段階の力学パラメータを用いるのではなく、任意の動作時における力学パラメータを逐次同定することが必要となる。

一般的な力学パラメータの同定手法には各関節のトルクの計測が必要となるが、現在普及している多くのロボットシステムには各関節にトルクセンサが搭載されておらず、

逆動力学などを用いて算出するには誤差が生じやすく、正確なトルクの計測が難しい。

そこで、床反力計測によるロボットシステムのベースリンクの運動方程式のみを用いた力学パラメータの実時間同定手法 [7] [8]を適用することで、モデル変化に逐次追従する順動力学モデルを作成し、任意の環境で逐次良好な制御性能を発揮できるモデルベース制御システムの開発を目指す。床反力の計測は 6 軸の力センサを用いるなどして計測でき、比較的容易である。また、計測位置を任意に選べることからセンサの取り付けによるロボットシステムの手先の負荷などを考慮しなくて良いという利点がある。

2. IDCS 制御手法

Inverse Dynamics Compensation via 'Simulation of feedback control systems'(IDCS)制御手法はシステムの順動力学モデルのみを用いたフィードバック制御シミュレーションにより近似的な逆動力学の計算を行う手法である。シミュレーションによる環境は観測ノイズや予期せぬ外乱などのフィードバック制御にとって望ましくない要素が存在せず、フィードバック制御にとって理想的な環境であり、一般に現実の制御より高い性能が得られる。そのため、常に理想的な操作量をシミュレーション領域で生成し、制御対象に加えることができる。

Fig. 1 は IDCS 制御手法の基本的な構成図であり、理想的な制御シミュレーション性能を現実世界において利用しようとするものである。Fig. 1 において、点線で囲まれた部分は数値シミュレーション環境であり、 P_M は制御対象 P と同じ動特性を有したシミュレーションモデルである。シミュレーション上でならば、上記の理由によりハイパフォーマンスな制御器 K_H が使用できるため、 P_M の出力 y_s は目標値 r に近づく。ここで P_M が P と同一であると考えると、 P の出力 y は目標値 r に従う。これは点線で囲まれた部分がシステムの逆動力学 P^{-1} に対応することを意味している。

また、IDCS 制御手法を用いる際、システムからの物理フィードバックを必要としないためにセンサレスで理想的な制御を実現することができる。これが IDCS 制御手法の基本概念である。

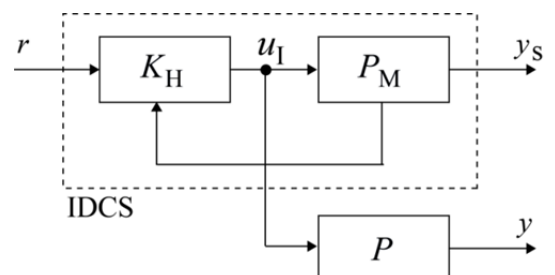


Fig.1 Block diagram of the IDCS control system

3. 制御対象

制御対象は Fig. 2 に示す振動抑制実験ロボットである。振動抑制実験ロボットは(株)日立プラントテクノロジーにてウェアの搬送用に用いられていたロボットシステムで、昇降テーブルを Fig. 2 の矢印 R_1 のように上下させ、またロボットアームを回転させることでウェアを搬送する。よって、ウェアを安全かつ効率良く運搬するために、ロボットアームを振動させることなく高速に動作させることが望まれる。今回は IDCS 制御手法の振動抑制に対する有効性を検討するために、ロボットアームの先端に 1kg のおもりのついた板ばねを取り付けることで振動しやすくした。

振動抑制実験ロボットは以下の 4 つの関節から構成される。

- 1 つの能動直動関節 R_1
- 1 つの能動回転関節 θ_2
- 2 つの受動回転関節 θ_3, θ_4

θ_3, θ_4 は θ_2 とギア拘束の関係にあり、Eq. 1, Eq. 2 のように回転するため、先端は直線的に動作する

$$\theta_2 = -2\theta_3 \quad (1)$$

$$\theta_2 = \theta_4 \quad (2)$$

昇降テーブル、ロボットアームにはエンコーダが搭載されており、関節変位、角度を計測できる。板ばねの先端には加速度センサをとりつけており、板ばねの鉛直方向の振動による加速度を計測できる。先行研究において SYMORO+ を用いて順動力学を得た [9] [10] [11]。

4. DMM 制御器のための伝達関数推定

振動抑制に適したモデルベース制御器である DMM 制御器を設計する上で、制御対象の各入力から出力までの伝達関数が必要となるため、得られた順動力学モデル P_M を用いて伝達関数の推定を行った。

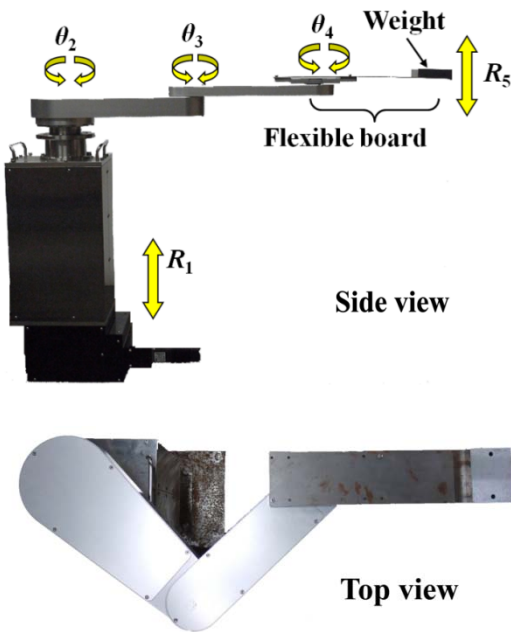


Fig. 2 The robot arm

今回は板ばねの振動抑制を目的とするため、昇降テーブルと板ばねのみを考えると、制御対象は Fig. 3 のように表せる。このとき M_1 は昇降テーブルが支持する質量、 M_2 は板ばね先端が支持する質量、 V, K はそれぞれ板ばねの粘性、および弾性である。これらのパラメータは力学同定によって得られた値を用いる [12] [13]。Fig. 3 より、昇降テーブルが発生する力 F から昇降テーブルの変位を y_1 、板ばねの先端加速度を \ddot{y}_2 として、それぞれの自由度に関する運動方程式を Eq. 3, Eq. 4 に示す。

$$M_1 \ddot{y}_1 = F - k(y_1 - y_2) - c(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) \quad (3)$$

$$M_2 \ddot{y}_2 = k(y_1 - y_2) + c(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) \quad (4)$$

Eq. 3, Eq. 4 から、昇降テーブルが発生する力 F から昇降テーブルの変位 y 、板ばねの先端加速度 \ddot{y}_2 までの伝達関数 $P_{Fy_1}, P_{F\ddot{y}_2}$ を Eq. 5, Eq. 6 に示す。

また、入力電圧 u から昇降テーブルが発生する力 F での伝達関数 P_{uF} を実験的に求める。入力電圧 u から昇降テーブルの加速度までの伝達関数は、モータドライバの特性に依存するため、昇降テーブルに加速度センサを取り付け、入力電圧 u に 0.1 Hz から 50 Hz のスイープ波を入力することで求めた。この伝達関数に昇降テーブルに加わる質量を乗算することで得られた入力電圧 u から昇降テーブルが発生する力 F までの伝達関数 P_{uF} を Eq. 7 に示す。Eq. 5, Eq. 6, Eq. 7 より、入力電圧 u から各出力までの伝達関数を Eq. 8, Eq. 9 に示す。これらの伝達関数をもとに DMM 制御器を設計する。

$$P_{Fy_1} = \frac{M_2 s^2 + cs + k}{M_1 M_2 s^4 + (M_1 + M_2) cs^3 + (M_1 + M_2) ks^2} \quad (5)$$

$$P_{F\ddot{y}_2} = \frac{cs + k}{M_1 M_2 s^2 + (M_1 + M_2) cs + (M_1 + M_2) k} \quad (6)$$

$$P_{uF} = \frac{a M_1 \omega^2 s^2}{s^2 + 2\xi \omega s + \omega^2} \quad (7)$$

$$P_{u\dot{y}_1} = \frac{d_2 s^2 + d_1 s + d_0}{s^4 + c_3 s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + c_0} \quad (8)$$

$$P_{u\ddot{y}_2} = \frac{e_3 s^3 + e_2 s^2}{s^4 + c_3 s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + c_0} \quad (9)$$

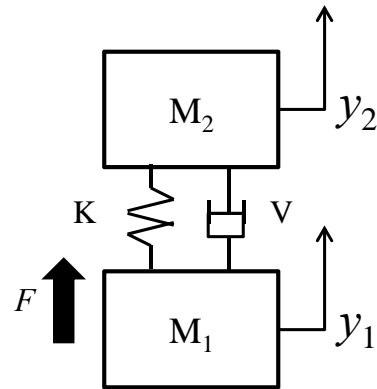


Fig. 3 Geometric structure of the controlled object

5. DMM 制御器の設計

ここでCTFMを応用したDMM(Dual Model Matching)制御器の設計について述べる。DMM制御器は望まれる特性を持つ閉ループ特性伝達関数行列(CTFM)を予め設定し、制御系が設定した特性に一致するような制御器を設計する2自由度制御系設計法である(3)(4)。DMM制御手法は、制御器が制御対象の伝達関数と全系の閉ループ伝達関数の極・零点を含んだ式で表されるため、制御器の設計が容易である。

制御対象にDMMを適用するとFig. 4に示される単入力多出力系として表せる。Fig. 4から、それぞれの制御器はEq. 10, Eq. 11, Eq. 12で表せる。

$$C_{rw} = W_{ru}(1 + W_{v_1u}P_{uy_1} + W_{v_2u}P_{u\ddot{y}_2})^{-1} \quad (10)$$

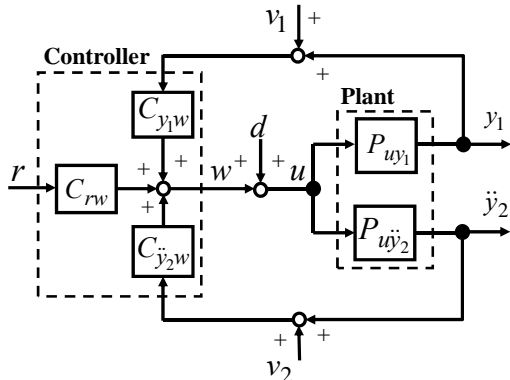
$$C_{v_1w} = W_{v_1u}(1 + W_{v_1u}P_{uy_1} + W_{v_2u}P_{u\ddot{y}_2})^{-1} \quad (11)$$

$$C_{v_2w} = W_{v_2u}(1 + W_{v_1u}P_{uy_1} + W_{v_2u}P_{u\ddot{y}_2})^{-1} \quad (12)$$

Eq. 10, Eq. 11, Eq. 12から、以下の特性を持つようにDMMを設計した。

- 板ばねの一次モードの減衰特性
- ノイズ低減特性

このように設計したDMMを用いた時の昇降テーブルの目標変位 r から昇降テーブルの出力変位 y_1 、板ばねの先端加速度 \ddot{y}_2 までの周波数応答をFig. 5, Fig. 6に示す。Fig. 5, Fig. 6から、板ばねの一次モードである6.7Hzにおいて減衰が付加されていることがわかる。



r :	Table target	w :	Controller output
d :	Disturbance	v_1 :	Noise from disp. sensor
u :	Manipulated variable	y_1 :	Table disp. output
v_2 :	Noise from acc. Sensor	\ddot{y}_2 :	Acc. of the flexible board

Fig. 4 Block diagram with DMM controller

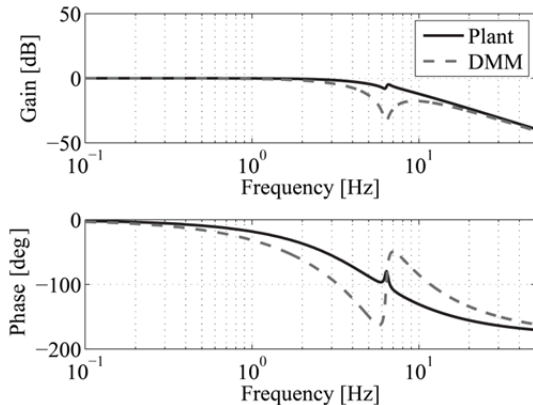


Fig. 5 Frequency response of W_{ry_1}

6. DMM 制御シミュレーション

得られたモデル、DMM制御器を用いて、昇降テーブルを目標位置まで動かすシミュレーションを、DMM制御器と非制御時を比較して行った。シミュレーション開始1秒後に昇降テーブルが6mmに到達するようなステップ入力を加えた時のシミュレーション結果をFig. 7, Fig. 8に示す。Fig. 7, Fig. 8から、シミュレーション上でDMM制御器は板ばねを振動させることなく、整定時間の短い制御を実現できたことがわかる。なお、シミュレーション上では信号ノイズなどの望まれない要因の影響を受けないため、IDCS制御手法とDMMの制御性能は等しい。

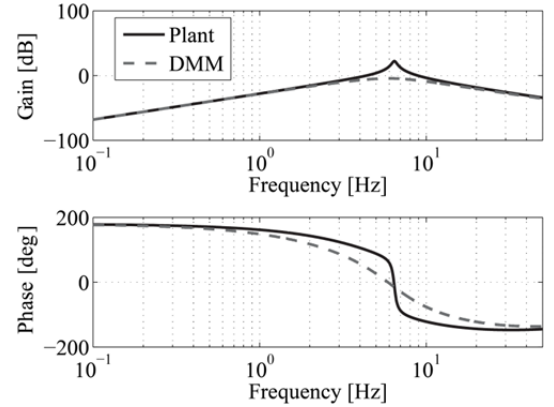


Fig. 6 Frequency response of W_{ry_2}

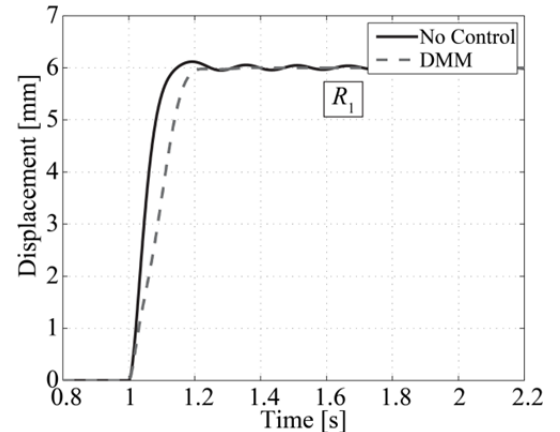


Fig. 7 Comparison of the control performance with DMM and no control in simulation

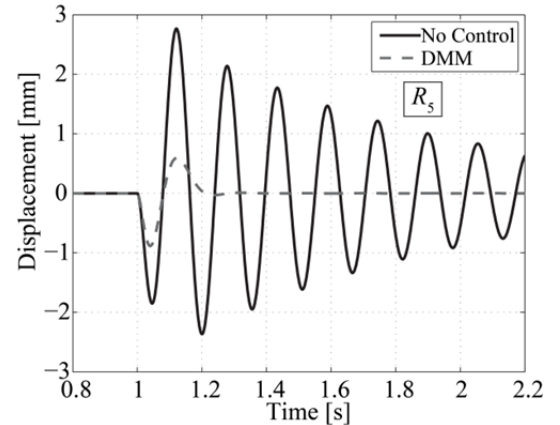


Fig. 8 Displacement of the tip of the flexible board with DMM and without control in simulation

7. DMM 制御実験

Fig. 1の構成でIDCS 制御手法を用い、昇降テーブルを目標位置まで動かす実験を行い、非制御時およびセンサ値をフィードバック（物理フィードバック）するDMM 制御と比較した。実験開始1 秒後に昇降テーブルに6mm に到達するようなステップ入力を加えた時の結果をFig. 9, Fig. 10 に示す。Fig. 9, Fig. 10 から、非制御時と比較してDMM制御、IDCS 制御手法では板ばねを振動させることなく、整定時間の短い制御を実現できた。また、IDCS 制御手法はセンサによるフィードバックがないにもかかわらず、DMM 制御と比較してほぼ同等な性能であることがわかる。このことから、IDCS 制御手法の振動抑制に対する実験での有効性を確認することが出来た。また、IDCS 制御手法のシミュレーションモデルが良好であることがわかる。

次に、IDCS制御手法のモデル誤差に対するロバスト安定性を、各リンクの質量を30% 増加させることで評価する。DMM制御器の設計時に各リンクの質量を実際の制御対象と比較して30%増加させると物理フィードバックによるDMM は不安定になった。一方、モデル誤差をシミュレーションモデルに付加したIDCS 制御手法と付加しなかったIDCS 制御手法を比較した結果をFig. 11, Fig. 12 に示す。Fig. 11, Fig. 12 から、誤差を付加されたIDCS 制御手法は付加される前のIDCS 制御手法と比較して1秒付近で振動が大きくなっているものの、誤差のない場合と比較しても十分な振動抑制が行えていることがわかる。よって、IDCS 制御手法のモデル誤差に対するロバスト性を確認することができた。

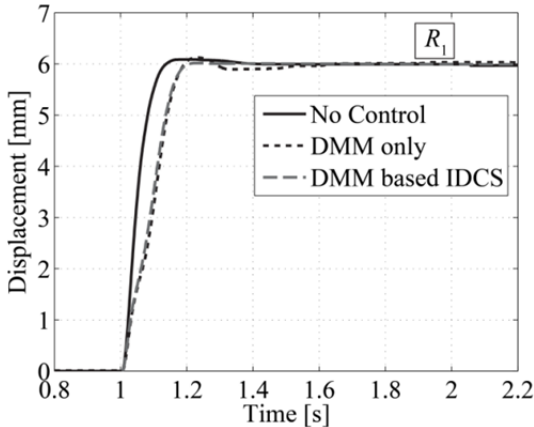


Fig. 9 Comparison of controller performances: No control, IDCS, DMM only

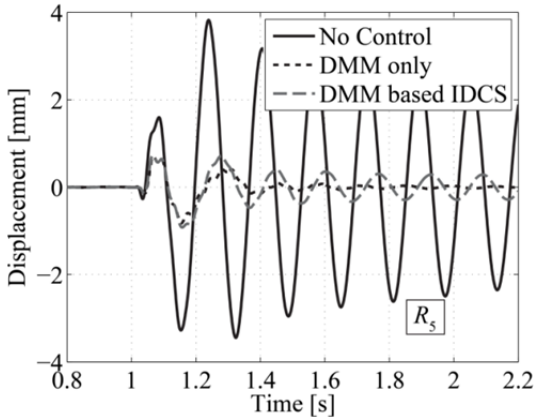


Fig. 10 Disp. of the tip of flexible board by: No control, DMM controller and IDCS

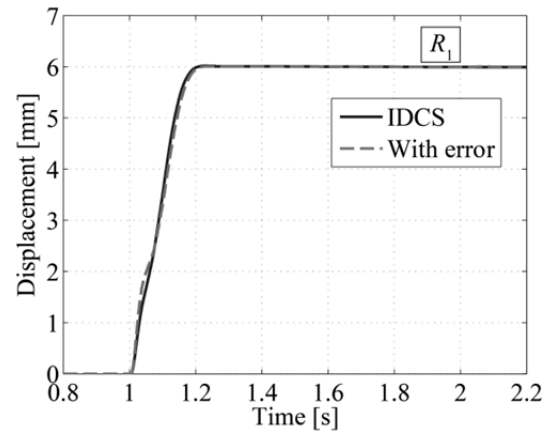


Fig. 11 Comparison of IDCS and with error

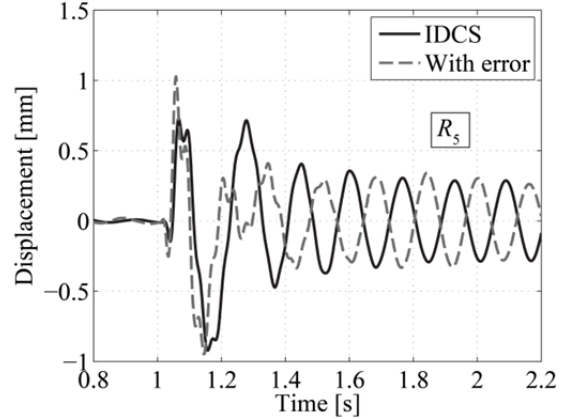


Fig. 12 Displacement of the tip of flexible board by IDCS and with error

8. 実時間同定

8.1 実時間同定アルゴリズム

モデルベース制御手法は簡単なフィードバック制御と比較して高い制御性能を発揮できるが、制御性能はロボットシステムのモデルの精度に依存する。一般的にロボットシステムのモデル化には、設計段階の CAD データから設定された力学パラメータが用いられることが多いが、電装系も含めた力学パラメータの算出は CAD データから算出することは困難である。また、産業用ロボットなどのロボットシステムは、力学パラメータが動作によって逐次変化し、モデルと実システムの間で誤差が生じることが考えられる。よって、任意の動作時における力学パラメータを逐次同定することが必要となる [14]。そこで、床反力計測を用いた実時間同定システムを開発する。

一般的にロボットの運動方程式について、最小力学パラメータでまとめて表したものを Eq. 13 に示す。

$$\begin{bmatrix} Y_{B1} \\ Y_{B2} \end{bmatrix} \phi_B = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^{N_c} \begin{bmatrix} K_{k1} \\ K_{k2} \end{bmatrix} F_k \quad (13)$$

なお、

- $Y = [Y_{B1} \ Y_{B2}]^T$ は ϕ_B にかかる係数行列であり、 $q_0, \dot{q}_0, \ddot{q}_0, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ の関数行列
- τ は関節トルク
- N_c はロボットと環境との接触点の総数
- F_k は接触点 k に働く外力(6 軸力)
- K_{ki} は接触点 k での外力を一般化力へ変換する行列で、点 k へのヤコビ行列の転置行列

とする。

ここで、Eq. 13 から、最小力学パラメータを得るには、

関節トルクの計測が必要となる。しかし、一般的に普及しているロボットシステムの多くはコストやサイズ、重さなどの制約からトルクセンサを各関節に搭載することが難しい。一方、フォースプレート等を利用して外力 F_k を計測することはロボットシステムに直接取り付けする必要がなく、また設置箇所も少ないために、比較的容易である。そこで、関節トルクを計測できないロボットシステムの力学パラメータの同定手法として、ベースリンクの運動方程式を利用し、各関節の変位、速度、加速度、床反力を計測することで、力学パラメータを同定する手法を適用する。Eq. 13 において、ベースリンクの運動方程式を表すと Eq. 14 のようになる。

$$Y_{B1}\phi_B = \sum_{k=1}^{N_c} K_{k1}F_k \quad (14)$$

Eq. 13 に示された線形システムに対して、逐次最小二乗法 [15] を適用して得られた実時間同定アルゴリズムを Eq. 15, Eq. 16, Eq. 17 に示す。

$$\phi_{B,n} = \phi_{B,n-1} + K_n(F_n - Y_n\phi_{B,n-1}) \quad (15)$$

$$K_n = P_{n-1}Y_n'(E + Y_nP_{n-1}Y_n')^{-1} \quad (16)$$

$$P_n = P_{n-1} - P_{n-1}Y_n'(E + Y_nP_{n-1}Y_n')^{-1}Y_nP_{n-1} \quad (17)$$

8.2 実時間同定結果 Eq. 15, Eq. 16, Eq. 17 を元にフォースプレート上に振動抑制実験ロボットを乗せ、各関節を動かして力学同定を行った。得られた実時間同定結果 ϕ_{real} と、先行研究で行ったオフライン同定結果 $\phi_{non-real}$ との比較を Table 1 に示す。 h は以下の式で求めた。

$$h = 100 \times \phi_{real} / \phi_{non-real} \quad (18)$$

また、 M_2R , OFF_6 のパラメータ推移を Fig. 13, Fig. 14 に示す。Table 1 から、 MY_1 , MX_4 , M_2R , OFF_6 に関してはオフライン同定とほぼ同じ精度の同定結果が得られたが、その他のパラメータの結果は良好でないことがわかる。これは、オフライン同定ではロボットアームの動作に関して複数の速度を持たせて実験を行ったため良好な結果が得られたが、今回の実験で用いた振動抑制実験ロボットの動作に関してはロボットアームに関してドライバの関係上、ほぼ一定速度でしか動作できず、同定に十分な動作が得られていないためと考えられる。そのため、他の実験結果では MY_1 , MX_4 についても良好な結果が得られなかった。しかし、ロボットアームの速度変化に関わるドライバの設定は通常複雑な問題ではないため、様々なロボットシステムに対して、この床反力計測を基にした実時間同定アルゴリズムは有効であると考えられる。

Table 1 Real-time identification experiment result

Parameter	Results	h[%]	Parameter	Results	h[%]
MX_1	-4.12	266	MY_5	-1.26	47
MY_1	-6.40	109	ZZ_6	0.02	20
M_2R	44.31	103	XZ_6	1×10^{-6}	2×10^{-3}
ZZ_3R	0.14	52	YZ_6	6×10^{-6}	0.01
MX_4	7.12	104	MX_6	1×10^{-6}	7×10^{-4}
MY_4	-0.23	-781	MY_6	8×10^{-7}	9×10^{-5}
MX_5	5.46	165	OFF_6	438.8	97

なお、

- M_i [kg] はリンク i の質量に関するパラメータで、根元側の全リンクの全質量
- MX_i , MY_i , MZ_i [N·m] は各軸のリンク i の重心に関するパラメータ
- XZ_i , YZ_i , ZZ_i [kg·m²] はリンク i の各軸まわりの慣性モーメント
- ZZ_3R [kg·m²] はリンク 3 の慣性モーメント ZZ_3 とリンク 4 慣性モーメント ZZ_4 を用いて次式で表される。

$$ZZ_3R = ZZ_3 - ZZ_4 \quad (19)$$

- OFF_6 は昇降テーブルより下の質量とする。

次に、作成した実時間同定アルゴリズムを用いて、ロボットシステムのパラメータ変化に対する追従性を検証する。制御対象に無付加時の実験と同様の動作をさせ、実験開始約 2 秒後に昇降テーブルにのみ負荷が加わるように 2kg のおもりを置いた。この時の無付加時に良好な結果が得られた M_2R , OFF_6 のパラメータ推移を Fig. 15, Fig. 16 に示す。なお、同定パラメータの初期値として先行研究で行ったオフライン同定結果を用いた。Fig. 15, Fig. 16 から、おもりを付加した 2 秒付近ではロボットアーム上部におもりを加えたにもかかわらず、ロボット下部に質量が加わったという結果が得られた。これはおもりをおいた瞬間は衝撃的に質量が増加するため、同定アルゴリズムの誤認識したためと考えられる。しかしその後、 OFF_6 は波打ちながら減少し、おもりを付加する以前の値に収束していることがわかる。また、ロボット上部の質量 M_2R はおもり付加時の衝撃によって波打ちながら増加していることがわかる。またオフライン同定での M_2R , OFF_6 の総和は 88.9kg であったが、終端においては 90.5kg となっていたため、誤差はあるものの質量変化に追従していることがわかる。

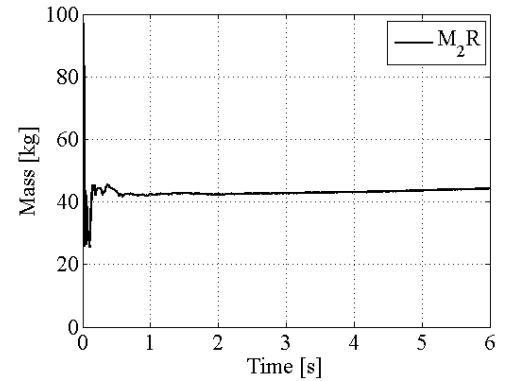


Fig. 13 M2R result in real-time

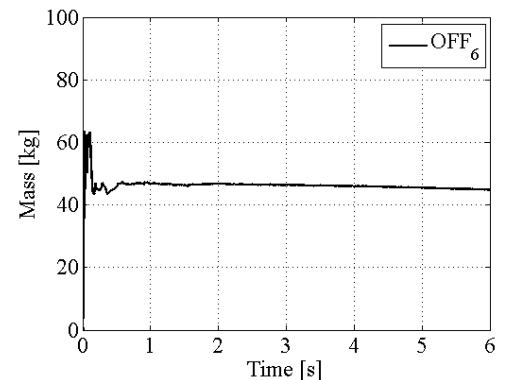
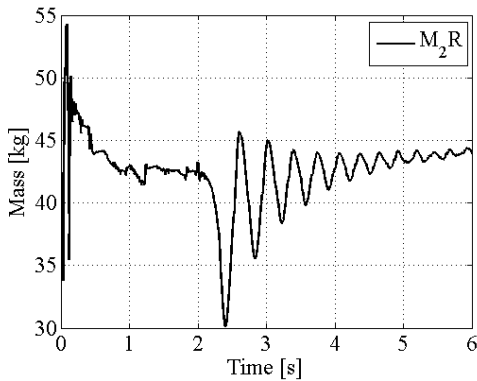
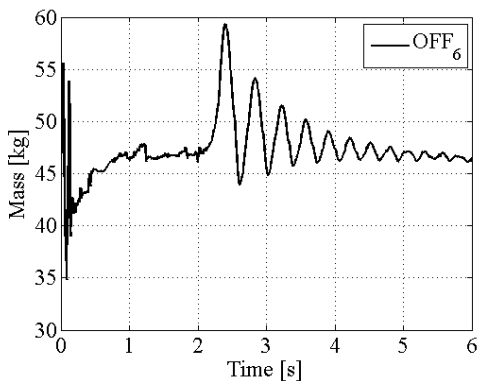


Fig. 14 OFF₆ result in real-time

Fig. 5.12 OFF₆ result in real-time with adding a weightFig. 5.12 OFF₆ result in real-time with adding a weight

9. 結言

本論文では床反力計測に基づく力学同定を用いた産業用ロボットの IDCS 制御の有効性について検討し、以下の結論を得た。

1. DMM 制御器と IDCS 制御手法を用いたセンサレスかつ整定時間の短い板ばね先端の振動抑制
2. IDCS 制御手法のセンサレスである利点を活かした、質量誤差によるモデルエラーに対するロバスト性
3. 床反力計測によるロボットシステムのベースリンクの運動方程式のみを用いた質量パラメータに関する実時間同定の有効性
4. 質量付加によるパラメータ変化に対する逐次最小二乗法を用いた実時間同定の追従性

今後の展開として、得られた力学パラメータを IDCS 制御手法のシミュレーションモデルに適用し、任意のロボットシステム、環境で利用できるパラメータ変化に対応したセンサレスな IDCS 制御手法の開発を行う必要がある。その際に、現在は同定時にロボットアームの先端に加速度センサを取り付けているが、また、シミュレーションモデルだけでなく、DMM 制御器の極設定などに力学パラメータの情報をフィードバックし、リアルタイムで最適な制御系を設計できるシステムの開発を行う必要がある。

謝辞

(株) 日立プラントテクノロジーより、振動抑制実験ロボットを提供いただいた。ここに謝意を表します。

- [1] 齋藤剛, “産業機械の安全技術の動向と次世代ロボットへの適用,” *ロボット学会誌*, 第 25 巻, 第 8 号, pp. 11-14, 2007.
- [2] Y. Tagawa, K. Fukui, "Inverse dynamics calculation of nonlinear model using low sensitivity compensator," in *Proc. Dynamics and Design Conference*, pp. 185-188, 1994.
- [3] Y. Tagawa, J. Y. Tu and D. Stoten, "Inverse dynamics compensation via 'simulation of feedback control systems'(IDCS)," *Proceedings of the IMechE, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2011.
- [4] K. Aoki, G. Venture and Y. Tagawa, "Dynamics identification of industrial robots using contact force for the IDCS control," *Proc. of the Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4710-4715, 2011.
- [5] Y. Tagawa, R. Tagawa and D. P. Stoten, "Characteristic Transfer function matrix-based linear feedback control system analysis and synthesis," *Int. Journal of Control*, vol. 82, no. 4, pp. 585-602, 2009.
- [6] M. Tagami, T. Yamashita, Y. Tagawa, M. Yasuda, H. Hora, K. Endo and Y. Noguchi, "Development of an Active Vibration-Canceling System Using Inertial Force Generators," *The 8th international conference on Motion and Vibration Control, Proceedings(CD-ROM), Paper No.*, vol. 1154, pp. 15-18, September 2008.
- [7] G. Venture, K. Ayusawa and Y. Nakamura, "Real-time Identification and Visualization of Human Segment Parameters," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Engineering in Medicine and Biology*, pp. 3983-3986, 2009.
- [8] W. Khalil, M. Gautier and P. Lemoine, "Identification of the payload inertial parameters of industrial manipulators," *In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 4943-4948, May 2007.
- [9] W. Khalil and D. Creusot, "Symoro+: a system for the symbolic modelling of robots. *obotica*," vol. 15, pp. 153-161, 1997.
- [10] J. Benesty, M. M. Sondhi and Y. Huang, "Springer Handbook of Speech Processing. Springer," p. 321, 2007.
- [11] 内山勝, 中村仁彦, “ロボットモーション,” 岩波書店, 2004.
- [12] W. Khalil, E. ombre, "Modelling Identification and Control of Robots," *Kogan Page Science*, 2004.
- [13] K. Aoki, G. Venture, Y. Tagawa, "IDCS control of industrial robots using inertial identification based on contact force sensor," *DVD Proceedings(CD-ROM) ROBOMECH*, 2011.
- [14] H. Mayeda, K. Osuka, A. Kanagawa, "A new identification method for serial manipulator arms," *In Pre. IFAC 9th World Congress*, p. 74-79, 1984.
- [15] 相良節夫, 秋月影雄, 中溝高好, 片山徹, “システム同定,” *計測 自動制御学会*, 1994.