

モータの軸受部の弾性とトルクリップルを考慮した水平 2関節形ダイレクトドライブロボットの振動解析*

小島 宏 行*¹, 桑 名 秀 晴*²
疋 田 嘉 一*², 水 野 寿 考*²

Vibration Analysis of a Horizontal Two-Link Direct-Drive Robot in Consideration of Bearing Elasticity and Torque Ripple of Motors

Hiroyuki KOJIMA, Hideharu KUWANA,
Yoshikazu HIKITA, and Hirotaka MIZUNO

In a direct-drive robot, motors are directly coupled to the links without reduction gears, and high-grade control performance can be achieved. However, transient vibrations may frequently be generated owing to little friction and torque ripple of motors. In this report, the transient vibration characteristics of a horizontal two-link direct-drive robot are investigated theoretically. In the analysis, the torque characteristics are modeled in consideration of the torque ripple and the torque saturation characteristics of direct-drive motors, and the nonlinear state equation of the direct-drive robot is derived in consideration of the bearing elasticity of motors. Numerical simulation is carried out, and the effects of the torque ripple, the torque saturation characteristics and the bearing elasticity of direct-drive motors on the transient vibration characteristics of the direct-drive robot are demonstrated.

Key Words: Robotics, Vibration, Transient Response, Mechanism, Automatic Control

1. 緒 言

ハーモニックドライブなどの減速機を内蔵する産業用ロボットは、FA 機器の中核として効果的に用いられているが、動力伝達機構の弾性や摩擦のために、高精度の位置制御やコンプライアンス制御が困難であることなどの欠点を有している。このため、関節部の動力伝達機構を取り除いたダイレクトドライブ方式（以下 DD と略す）の DD ロボットが、高速・高精度のロボットとして、大きな期待が寄せられ、これについて多くの研究がなされている⁽¹⁾。

動力伝達機構内蔵形のロボットアームが運動する場合、動力伝達機構の弾性や伝達トルクのリップルに起因する振動が誘発されることが、知られている^{(2)~(4)}。また、DD ロボットの場合においては、関節部の摩擦が極めて小さいことや、エンコーダと F-V 変換器による速度フィードバック信号の不完全性ならびに DD モータの構造に起因するトルクリップルにより、特に低速時において振動が誘発されやすい。そして、この

ことが、著者らの一部による実験によって、確認されている。このようなロボットの振動に関する研究として、ハーモニックドライブなどの動力伝達機構の弾性やトルクリップルに起因する振動を取り扱った研究^{(2)~(4)}や、アームの弾性を考慮したフレキシブルアームに関する研究⁽⁵⁾が、行われている。また、デジタルノッチフィルタや逆特性フィルタを適用することにより、DD モータの軸受部の弾性に起因する振動を抑制した実験結果^{(6)~(7)}が報告されている。さらに、ダブルリンク式スカラ形 DD ロボットの振動解析についての研究⁽⁸⁾もなされている。しかしながら、DD モータの軸受部の弾性やトルクリップルを考慮した DD ロボットの振動現象についての研究は、まだ見あたらないようである。

本研究は、DD モータの軸受部の弾性とトルクリップルを考慮して、水平 2 関節形ロボットの振動挙動を理論的に調べたものである。理論解析においては、著者らの一部が試作・開発した水平 2 関節形 DD ロボットの機構部を想定し、力学モデルの運動方程式を導くとともに、PD 方式位置制御システムの電流方程式と連立させ、力学・制御連成系の状態方程式を求めている。さらに、数値シミュレーションを行い、DD モータの軸受部の弾性やトルクリップルならびに制御システ

* 平成 2 年 3 月 10 日 東北支部第 25 期総会講演会において講演、原稿受付 平成元年 5 月 31 日。

¹ 正員、群馬大学工学部 (〒376 桐生市天神町 1-5-1)。

² 沖電気工業(株) (〒370 高崎市双葉町 3-1)。

ムのパラメータが、数値シミュレーションモデルのロボットの振動応答に及ぼす影響の一端を調べている。

2. 理論解析

2.1 DDモータのトルクの定式化 DDモータの軸受部の弾性を考慮した場合の水平2関節形の機構部のモデルを、図1に示す。このロボットの関節部に取付けられているDDモータのトルクリップル特性ならびに、電流に対するトルクの飽和特性は、図2、3に示すとおりである。これらの特性は、著者らの一部が試作したDDロボットのものと同様に設定されている。本研究では、図2、3の特性に基づいて、DDモータのトルク T_{mi} を、次式のように定式化して取扱うことにする。

$$T_{mi} = f_{\theta_i}(\theta_i) f_{q_i}(q_i), \quad i=1, 2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} f_{\theta_i} &= 1 + A_{i1} \sin(2\pi\theta_i/\theta_{ri}) + A_{i2} \sin(12\pi\theta_i/\theta_{ri}) \\ f_{q_i} &= B_{i1}q_i + B_{i3}q_i^3 + B_{i5}q_i^5 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 θ_i はDDモータの回転角、 q_i は電流、 θ_{ri} はトルクリップルの角度周期、 A_{ij} 、 B_{ij} は係数を示している。

2.2 機構部の運動方程式の導出 図1のように、DDモータの軸受部の弾性を考慮した場合の各リンクの重心の速度 \bar{v}_1 、 \bar{v}_2 は、図1中の記号を用いると、次式のように、導くことができる。

$$\begin{aligned} \bar{v}_1^2 &= \dot{u}_1^2 + \dot{v}_1^2 + (l_{c1} \dot{\theta}_1)^2 \\ &\quad + 2l_{c1} \dot{\theta}_1 (-\dot{u}_1 S_1 + \dot{v}_1 C_1) \quad \dots\dots\dots (3) \\ \bar{v}_2^2 &= \dot{u}_2^2 + \dot{u}_2^2 + \dot{v}_2^2 + \dot{v}_2^2 + (l_1 \dot{\theta}_1)^2 \\ &\quad + \{l_{c2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\}^2 + 2(\dot{u}_1 \dot{u}_2 + \dot{v}_1 \dot{v}_2) \\ &\quad + 2l_1 l_{c2} \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) C_2 \\ &\quad + 2l_1 \dot{\theta}_1 (-\dot{u}_1 S_1 + \dot{v}_1 C_1) \\ &\quad + 2l_{c2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) (-\dot{u}_1 S_{12} + \dot{v}_1 C_{12}) \\ &\quad + 2l_1 \dot{\theta}_1 (-\dot{u}_2 S_1 + \dot{v}_2 C_1) \\ &\quad + 2l_{c2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) (-\dot{u}_2 S_{12} + \dot{v}_2 C_{12}) \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \sin \theta_1, \quad C_1 = \cos \theta_1 \\ S_{12} &= \sin(\theta_1 + \theta_2), \quad C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

であり、 u_1 、 v_1 、 u_2 、 v_2 は軸受部の弾性変位、 l_{c1} 、 l_{c2} は関節部とリンク重心までの距離、 l_1 は第1リンクの長さである。一方、図1の機構部のラグランジュアン L ならびに損失エネルギー D は、式(3)、(4)を用いると、次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} L &= T - U + W \quad \dots\dots\dots (6) \\ 2D &= C_{m1} \dot{\theta}_1^2 + C_{m2} \dot{\theta}_2^2 + C_{j1} (\dot{u}_1^2 + \dot{v}_1^2) \end{aligned}$$

$$+ C_{j2} (\dot{u}_2^2 + \dot{v}_2^2) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに

$$\begin{aligned} 2T &= J_{c1} \dot{\theta}_1^2 + J_{c2} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \\ &\quad + m_1 \{ \dot{u}_1^2 + \dot{v}_1^2 + (l_{c1} \dot{\theta}_1)^2 + 2l_{c1} \dot{\theta}_1 (-\dot{u}_1 S_1 \\ &\quad + \dot{v}_1 C_1) \} + m_2 \{ \dot{u}_2^2 + \dot{u}_2^2 + \dot{v}_2^2 + \dot{v}_2^2 + (l_1 \dot{\theta}_1)^2 \\ &\quad + \{l_{c2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\}^2 + 2(\dot{u}_1 \dot{u}_2 + \dot{v}_1 \dot{v}_2) \end{aligned}$$

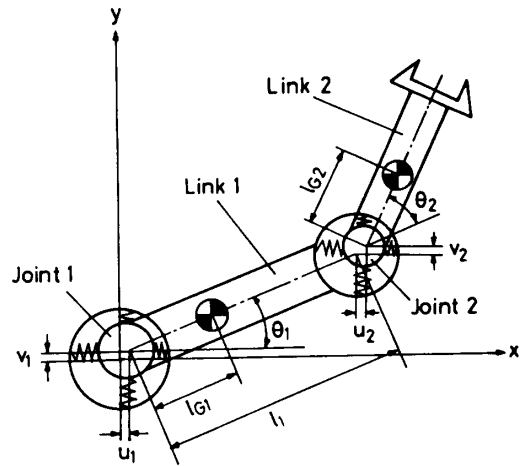


図1 水平2関節形DDロボットの機構部のモデル

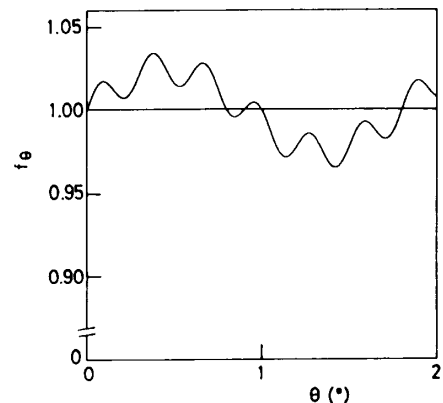


図2 DDモータのトルクリップル特性

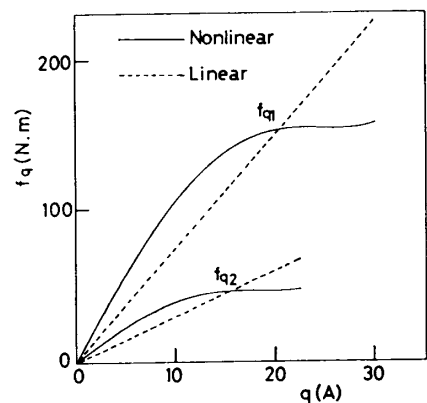


図3 DDモータの電流に対するトルクの飽和特性

1354 モータの軸受部の弾性とトルクリップルを考慮した水平2関節形ダイレクトドライブロボットの振動解析

$$\begin{aligned}
 &+ 2l_1 l_{c2} \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) C_2 + 2l_1 \dot{\theta}_1 (-\dot{u}_1 S_1 + \dot{v}_1 C_1) \\
 &+ 2l_{c2} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) (-\dot{u}_1 S_{12} + \dot{v}_1 C_{12}) \\
 &+ 2l_1 \dot{\theta}_1 (-\dot{u}_2 S_1 + \dot{v}_2 C_1) \\
 &+ 2l_{c2} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) (-\dot{u}_2 S_{12} + \dot{v}_2 C_{12})] \dots\dots\dots (8)
 \end{aligned}$$

$$2U = K_1(u_1^2 + v_1^2) + K_2(u_2^2 + v_2^2) \dots\dots\dots (9)$$

$$W = T_{m1} \theta_1 + T_{m2} \theta_2 \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 T は運動エネルギー、 U はポテンシャルエネルギー、 W は DD モータのトルクによるポテンシャルエネルギーを意味しており、 m_1, m_2 はリンクの質量、 J_{G1}, J_{G2} はリンク重心のまわりの慣性モーメント、 K_1, K_2 は DD モータの軸受部のばね定数、 $C_{m1}, C_{m2}, C_{j1}, C_{j2}$ は減衰力係数である。

ラグランジュの運動方程式は、一般化座標を \bar{q}_i とすると

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\bar{q}}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \bar{q}_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\bar{q}}} = 0 \dots\dots\dots (11)$$

のように表されるが、式(6)、(7)を式(11)に代入すると、次式の機構部の運動方程式が、導かれる。

$$\begin{Bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{u}_1 \\ \ddot{v}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{v}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ & M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ & & M_{33} & 0 & M_{35} & 0 \\ & & & M_{44} & 0 & M_{46} \\ \text{symmetrical} & & & & M_{55} & 0 \\ & & & & & M_{66} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \bar{b}_1 \\ \bar{b}_2 \\ \bar{b}_3 \\ \bar{b}_4 \\ \bar{b}_5 \\ \bar{b}_6 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (12)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned}
 M_{11} &= J_1 + J_2 + m_2 l_1^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} C_2 \\
 M_{12} &= J_2 + m_2 l_1 l_{c2} C_2 \\
 M_{13} &= -(m_1 l_{c1} + m_2 l_1) S_1 - m_2 l_{c2} S_{12} \\
 M_{14} &= (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) C_1 + m_2 l_{c2} C_{12} \\
 M_{15} &= -m_2 (l_1 S_1 + l_{c2} S_{12}) \\
 M_{16} &= m_2 (l_1 C_1 + l_{c2} C_{12})
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

$$M_{22} = J_2, \quad M_{23} = -m_2 l_{c2} S_{12}, \quad M_{24} = m_2 l_{c2} C_{12} \\ M_{25} = -m_2 l_{c2} S_{12}, \quad M_{26} = m_2 l_{c2} C_{12} \dots\dots\dots (14)$$

$$M_{33} = m_1 + m_2, \quad M_{35} = m_2 \dots\dots\dots (15)$$

$$M_{44} = m_1 + m_2, \quad M_{46} = m_2 \dots\dots\dots (16)$$

$$M_{55} = m_2 \dots\dots\dots (17)$$

$$M_{66} = m_2 \dots\dots\dots (18)$$

$$\bar{b}_1 = m_2 l_1 l_{c2} (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) S_2 - C_{m1} \dot{\theta}_1 + T_{m1} \quad (19)$$

$$\bar{b}_2 = -m_2 l_1 l_{c2} \dot{\theta}_1^2 S_2 - C_{m2} \dot{\theta}_2 + T_{m2} \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\begin{aligned}
 \bar{b}_3 &= (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) \dot{\theta}_1^2 C_1 + m_2 l_{c2} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 C_{12} \\
 &- C_{j1} \dot{u}_1 - K_1 u_1 \dots\dots\dots (21)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{b}_4 &= (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) \dot{\theta}_1^2 S_1 + m_2 l_{c2} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 S_{12} \\
 &- C_{j1} \dot{v}_1 - K_1 v_1 \dots\dots\dots (22)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{b}_5 &= m_2 \{ l_1 \dot{\theta}_1^2 C_1 + l_{c2} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 C_{12} \} - C_{j2} \dot{u}_2 \\
 &- K_2 u_2 \quad \dots\dots\dots (23)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{b}_6 &= m_2 \{ l_1 \dot{\theta}_1^2 S_1 + l_{c2} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 S_{12} \} - C_{j2} \dot{v}_2 \\
 &- K_2 v_2 \quad \dots\dots\dots (24)
 \end{aligned}$$

$$J_1 = J_{G1} + m_1 l_{c1}^2, \quad J_2 = J_{G2} + m_2 l_{c2}^2 \quad \dots\dots\dots (25)$$

2.3 力学・制御連成系の状態方程式

図4は、位置制御システムのブロック線図を示したものであり、DD モータの電流方程式は、次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
 L_{mi} \dot{q}_i &= F_{ki} (\theta_{ci} - \theta_i) - (F_{ci} + F_{mi}) \dot{\theta}_i \\
 &- (R_{mi} + F_{qi}) q_i, \quad i=1, 2 \dots\dots\dots (26)
 \end{aligned}$$

ここに、 F_{ki} は位置フィードバック係数、 F_{ci} は速度フィードバック係数、 F_{qi} は電流フィードバック係数、 θ_{ci} は位置の制御指令値、 L_{mi}, R_{mi}, F_{mi} は DD モータのインダクタンス、抵抗ならびに逆起電力係数であり、図4中の $f_{af\theta}$ は DD モータの電流ならびにロータの回転角に関する関数の積、すなわち式(1)を意味している。

したがって、式(12)と式(26)とを連立させることにより、水平2関節形 DD ロボットの力学・制御連成系の状態方程式は、次式のように表すことができる。

$$\dot{Y} = B \dots\dots\dots (27)$$

ここに

$$\begin{aligned}
 Y &= (\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{u}_1, \dot{v}_1, \dot{u}_2, \dot{v}_2, \theta_1, \theta_2, u_1, v_1, \\
 &u_2, v_2, q_1, q_2)^T \quad \dots\dots\dots (28)
 \end{aligned}$$

$$B = \{B_1, B_2, \dots, B_{14}\} \dots\dots\dots (29)$$

あり、 B の各要素は式(12)および式(26)の右辺などから構成されている。

3. 数値シミュレーション結果

数値シミュレーションで用いた DD ロボットの機構部の諸元はわ DD モータの軸受部の剛性と減衰係数を除き、著者らの一部が試作した DD ロボットとほぼ同様の値を採用している。これらの値は、 $m_1 = 27.65 \text{ kg}$ 、 $m_2 = 12.45 \text{ kg}$ 、 $J_{G1} = 0.792 \text{ 2 kg} \cdot \text{m}^2$ 、 $J_{G2} = 0.281 \text{ 7 kg} \cdot \text{m}^2$ 、 $l_1 = 25 \text{ cm}$ 、 $l_2 = 30 \text{ cm}$ 、 $l_{c1} = 7.3 \text{ cm}$ 、 $l_{c2} = 12.45 \text{ cm}$ 、 $C_{m1} = 0.671 \text{ N} \cdot \text{m/s}$ 、 $C_{m2} = 0.098 \text{ N} \cdot \text{m/s}$ のとおりであり、 l_2 は第2リンクの長さである。また、DD モータのトルクの電流に対する飽和特性を示す係数の値は、 $B_{11} = 11.9 \text{ N} \cdot \text{m/A}$ 、 $B_{13} = -1.32 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m/A}^3$ 、

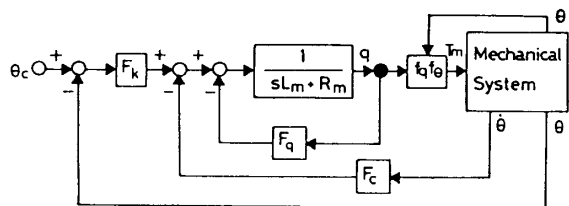


図4 位置制御システムのブロック線図

$B_{15}=6.42 \times 10^{-6} \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}^5$, $B_{21}=4.75 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$, $B_{23}=-9.38 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}^3$, $B_{25}=8.21 \times 10^{-6} \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}^5$ としてあり, トルクリップルの角度周期は, $\theta_{r1}=1.8^\circ$, $\theta_{r2}=2.9^\circ$ のとおりである. なお, DD モータの電気的定数は, $R_{m1}=1.3 \Omega$, $R_{m2}=1.0 \Omega$, $L_{m1}=10 \text{ mH}$, $L_{m2}=12.9 \text{ mH}$, $F_{m1}=15 \text{ V}\cdot\text{s}/\text{rad}$, $F_{m2}=7 \text{ V}\cdot\text{s}/\text{rad}$ のようである. さらに, サーボ位置制御システムのパラメータは, $F_{k1}=12.4 \times 10^7 \text{ V}/\text{rad}$, $F_{k2}=5.61 \times 10^6 \text{ V}/\text{rad}$, $F_{c1}=3.61 \times 10^4 \text{ V}\cdot\text{s}/\text{rad}$, $F_{c2}=1.65 \times 10^4 \text{ V}\cdot\text{s}/\text{rad}$ のように設定されている.

図5~7に, 力学・制御連成系の非線形の状態方程式(25)をルンゲ・クッタ法を用い, 数値計算の時間のきざみ幅を $\Delta t=3 \times 10^{-5} \text{ s}$ として行った数値シミュレーション結果を示す. まず図5は, DD モータの軸受部の剛性が大きく, 電流フィードバック係数が比較的大きい場合の第1関節部の回転角, 回転角速度ならびに関節部の静止座標系 $x-y$ の x 方向における動的変形を,

描いたものである. 図5より, 関節部の回転角ならびに回転角速度においてはほとんど振動成分は見られないが, 関節部の動的変形は, ロボットの運動パターンに加速度に基づく変位成分と, 低周波と高周波の振動成分とから構成されていることがわかる. 低周波振動成分はサーボ位置制御システムの制御剛性に起因し, 高周波振動成分はDDモータの軸受部の剛性によるものと考えられる. なお図5(a)は, DDモータのトルクリップルを図2のように比較的小さく設定した場合であるが, このトルクリップルの振幅を大きくすると, 図5(b)のように, 振動成分が大となり, 特に高周波振動成分が大きくなる傾向にある. すなわち, DDモータのトルクリップルの振幅の大小に応じて, 関節部の振動波形の振幅や振動の形状が複雑に変化することがわかる. 図6は, DDモータの軸受部の剛性が大きく, 電流フィードバック係数が比較的小さい場合の系の動的応答を示したものであり, 関節部の回転角速度なら

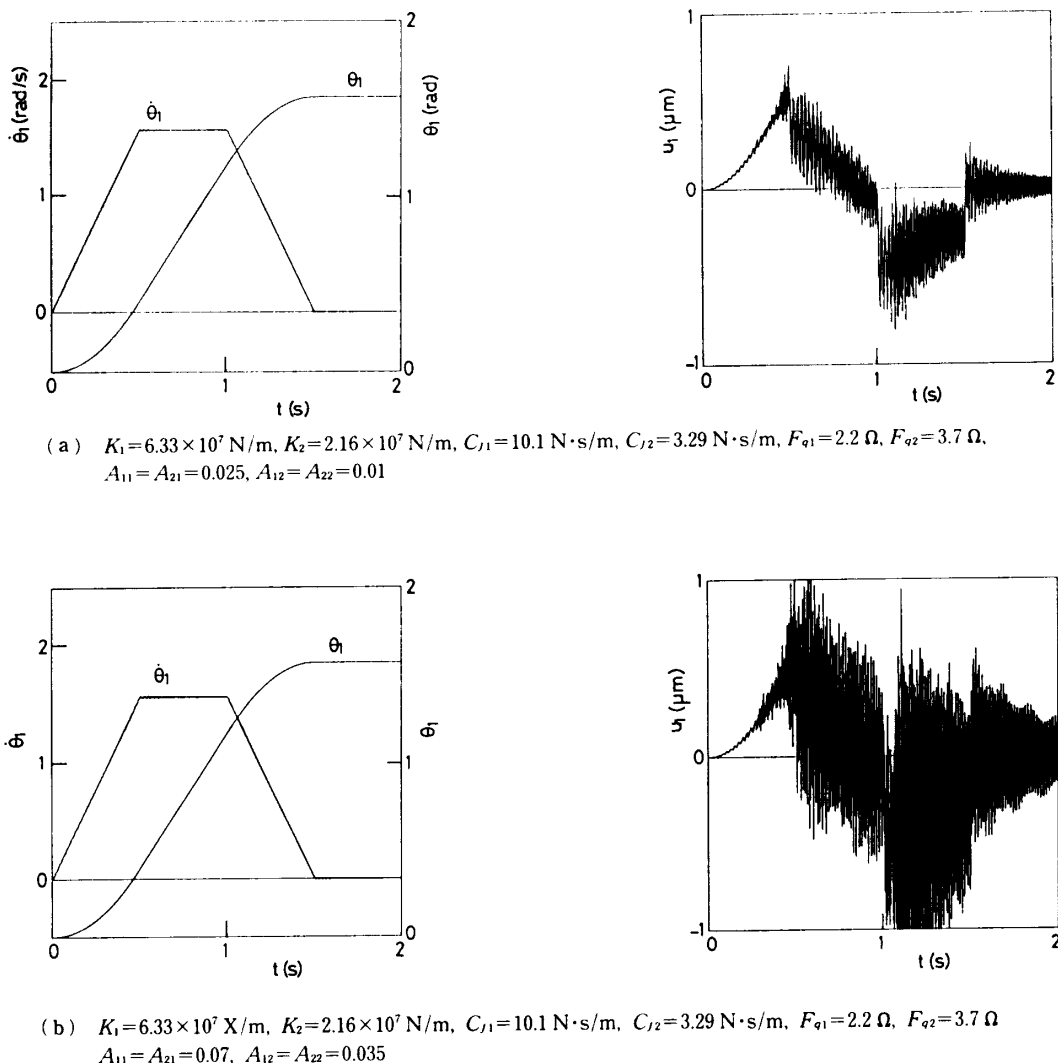


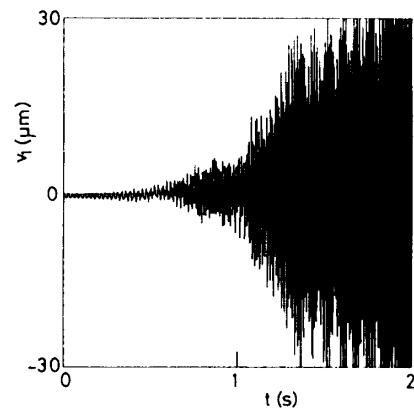
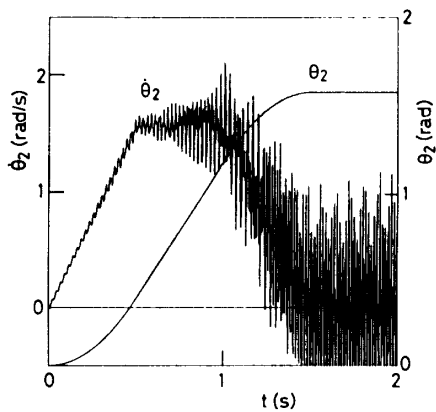
図5 DDモータの軸受部の剛性が大きく, 電流フィードバック係数が比較的大きい場合の系の動的応答

1356 モータの軸受部の弾性とトルクリップルを考慮した水平2関節形ダイレクトドライブロボットの振動解析

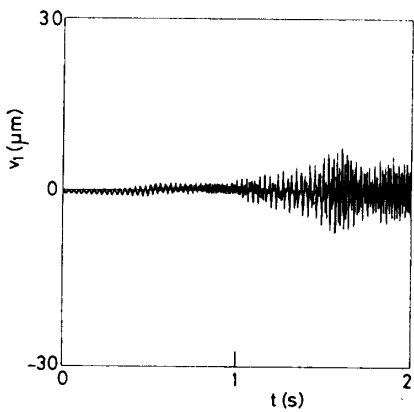
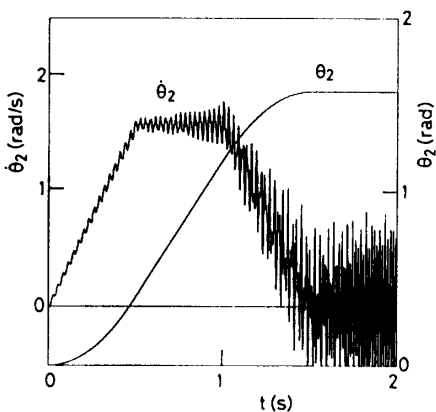
びに静止座標系の y 方向の動的変形成分に、顕著な低周波振動成分が生起している。このことは、電流フィードバック係数が小さい場合、DD モータのインダクタンスが、抵抗と電流フィードバック量との和よりも相対的に小さくなるために、速度フィードバック信号が、振動数の増加につれ実際の速度よりも遅れ、制御減衰力が、速度に正確に比例してなくなることに起因するものと推定される。また図 6 (b) は、DD モータの電流に対するトルクの非線形特性を、図 3 の破線のように線形化した場合の結果であるが、非線形性を考慮した場合に比べ、関節部の回転速度ならびに y 方向の動的変形の振動振幅より小さくなっており、この傾向は y 方向の動的変形において著しく、特に高周波振動成分が大幅に小さくなっている。なお、図 6 (b) 以外の数値シミュレーションにおいては、DD モータの電流に対するトルクの特性が、図 3 の実線のように非線形である場合を取扱っている。図 7 に、DD モータの

軸受部の剛性の値が小さく、電流フィードバック係数が比較的小さい場合の動的応答を示す。この場合、DD モータの軸受部の剛性が小さいことから、関節部の x 方向の動的変形においては、振動振幅の値が、図 6 のものに比べかなり大きく、高周波振動数成分の割合は、極めて小さくなっている。また、関節部の回転角速度の振動振幅は、図 6 のものに比べわずかに小さくなっている。このことは、電流フィードバック係数が小さいことに起因する関節部の回転の非定常振動が、DD モータの軸受部の弾性と粘性とにより、わずかではあるが減衰されことに起因するものと思われる。

なお、図 6, 7 の関節部の y 方向の振動波形の形状は、図 5 におけるものとはかなり異なり、運動パターンの加速度に対応する変位成分の割合は極めて小となり、振動成分が支配的となっている。このことは、回転速度の振動成分と残留振動成分とが、ロボットの運動パターンに対応する加速度成分よりかなり大きいこ



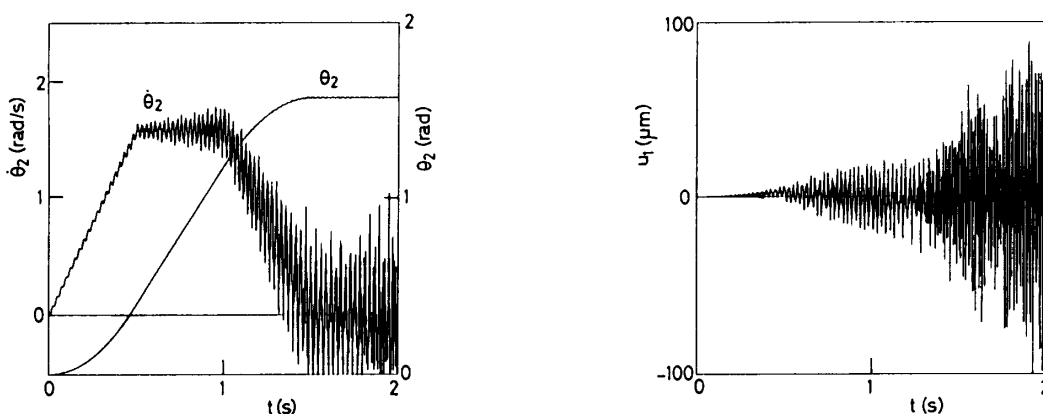
(a)



(b)

$$K_1 = 6.33 \times 10^7 \text{ N/m}, K_2 = 2.16 \times 10^7 \text{ N/m}, C_{11} = 10.1 \text{ N}\cdot\text{s/m}, C_{12} = 3.29 \text{ N}\cdot\text{s/m}, F_{q1} = 1.8 \Omega, F_{q2} = 3.1 \Omega, \\ A_{11} = A_{21} = 0.025, A_{12} = A_{22} = 0.01$$

図 6 DD モータの軸受部の剛性が大きく、電流フィードバック係数が比較的小さい場合の系の動的応答



$$K_1=1.28 \times 10^7 \text{ N/m}, K_2=4.25 \times 10^6 \text{ N/m}, C_{J1}=4.54 \text{ N}\cdot\text{s/m}, C_{J2}=1.46 \text{ N}\cdot\text{s/m}, F_{q1}=1.8 \Omega, F_{q2}=3.1 \Omega, \\ A_{11}=A_{21}=0.025, A_{12}=A_{22}=0.01$$

図 7 DD モータの軸受部の剛性が小さく、電流フィードバック係数が比較的小さい場合の系の動的応答

とに起因するものと考えられる。

4. 結言および今後の課題

本報は、水平2関節形ダイレクトドライブロボットの過渡振動応答を、ダイレクトドライブモータの軸受部の弾性とトルクリップルを考慮し理論的に調べたものである。理論解析においては、まず実機のダイレクトドライブモータのトルクリップル特性と電流に対するトルクの飽和特性を考慮して、トルクをモデル化するとともに、モータの軸受部の弾性を考慮した水平2関節形ダイレクトドライブロボットの機構部の運動方程式を導き、PD方式位置制御システムの電流方程式と連立させ、力学・制御連成系の状態方程式を求めた。このようなモデル化されたダイレクトドライブロボットについて数値シミュレーションを行ったところ、電流フィードバック係数が比較的小さい場合、関節部の水平方向の動的変形波形においては、ロボットの運動パターンの加速度に対応する変位成分と、制御剛性ならびにモータの軸受部の剛性に対応する低周波ならびに高周波振動成分が見られた。また、モータのトルクリップルが大きいほど、関節部の動的変形の振動振幅は、大となることが認められた。さらに、電流フィードバック係数が小さくなると、関節部の回転速度ならび

に水平方向の動的変形における非定常振動の振幅は大きくなり、この振動振幅の値は、電流に対するモータのトルクの飽和特性の有無ならびにモータの軸受部の剛性の大小によって、かなり異なってくることが、確かめられた。

本報においては、ダイレクトドライブモータの軸受部の弾性ならびに位置制御システムを、比較的簡単にモデル化して、理論解析および数値シミュレーションを行ったが、クーロン摩擦などを考慮したダイレクトドライブモータ軸受部の詳細なモデル化、より高度な位置制御システムを用いた場合の検討、実験と数値シミュレーションとの比較検討などが今後の課題として考えられる。

文 献

- (1) 浅田, 計測自動制御学会論文集, 19-1 (1986), 891.
- (2) 日高・笹原・谷岡・岡田, 機論, 52-480, C (1986), 2207.
- (3) Futami, S., Kyura, N. and Hara, S., *IEEE Trans. Ind. Elect.*, IE30-3 (1983), 299.
- (4) 小島・田口・辻, 機論, 55-517, C(1989), 2390.
- (5) 例えば, 福田, 機論, 51-468, C (1985), 2140.
- (6) 未広・高瀬, 第24回SICE 学術講演会論文集, (1985), 297.
- (7) 岩金・井上, 電学論 D, 107-1 (1987), 13.
- (8) 小西・青山・稲崎, 機論, 55-510, C (1989), 382.