5 1 2 マルチボディダイナミクス理論を用いたトラッククレーンの振動制御 Vibration control of a truck crane based on multi-body dynamics model.

○学 原井 篤志 (徳大院) 正 日野 順市 (徳大工)
正 芳村 敏夫 (徳大工) 正 栗本 政雄 (徳大工)

Atsushi Harai; School of Engineering, The University of Tokushima, Minamijosanjima-cho 2-1, Tokushima 770-8506, Japan
Junichi Hino, Toshio Yoshimura, and Masao Kurimoto; Faculty of Engineering, The University of Tokushima

Key words : A truck crane, Multi-body dynamics, Fuzzy control, SIRMs fuzzy reasoning

1. 緒言

マルチボディダイナミクス(剛体多体系)理論は、コンピュータを利用した機構解析の理論として、1980年代から発展してきたが、近年の計算機速度および数値計算手段の進歩により、近年さかんに研究が行われるようになってきた。

本研究では、局所座標系やオイラー角、オイラーパラメータを用いて運動方程式を導出し、3次元運動に対するクレーンモデルを作成する。また、そのモデルを用いて、ブームの位置決めおよび吊り荷の振れ止め制御を行う。また、今回は制御力の決定方法として、ブームの位置決めには2入力型のファジィ制御、吊り荷の振れ止めにはSIRMs ファジィ制御を用いる。

2. 運動学^{(1),(2)}

2. 1 オイラー角とオイラーパラメータ

本研究では、3次元bodyの姿勢を表すパラメータとしてオイラー角とオイラーパラメータを用いる。これらを用いることによって、ある座標系の原点が基準座標系の原点と一致していれば、2つの座標系は一致し、x,y,z 軸のどの軸まわりに回転させても、基準方向からある量だけ回転させることで、それらを任意の方向に向けることができる。

オイラー角の定義には何種類かあるが、ここではz-y-z形のオイラー角 $\gamma = [\phi \ \theta \ \psi]^T$ を定義する。z-y-z形は、最初z軸まわりに ϕ 回転させ、つぎにy軸まわりに θ 回転させ、さらにz軸まわりに ψ 回転させて任意の姿勢を作り出すものである。最終的な座標系から最初の座標系への変換マトリクスAは

$$A = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta \cos \psi - \sin \phi \sin \theta & -\cos \phi \cos \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \theta \\ \sin \phi \cos \theta \cos \psi + \cos \phi \sin \theta & -\sin \phi \cos \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \theta \\ \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

となる。また、原点を共有する2つの座標系において、 Σ をある単位ベクトルuまわりに回転角 χ だけ回転することで、 Σ' に一致させることができる。このとき

$$e_0 = \cos \frac{\chi}{2}, \quad e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = u \sin \frac{\chi}{2} \quad (2)$$

と定義する。この e_0, e をオイラーパラメータと呼ぶ。オイラーパラメータは4個であり、空間の自由度は3であるから、オイラーパラメータには拘束 $e_0^2 + e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 = 1$ が課される。オイラーパラメータをまとめて $p = [e_0, e_1, e_2, e_3]^T$ と表すことにすると、Aは

$$A = 2 \begin{bmatrix} e_0^2 + e_1^2 - \frac{1}{2} & e_1 e_2 - e_0 e_3 & e_1 e_3 + e_0 e_2 \\ e_1 e_2 + e_0 e_3 & e_0^2 + e_2^2 - \frac{1}{2} & e_2 e_3 - e_0 e_1 \\ e_1 e_3 - e_0 e_2 & e_2 e_3 + e_0 e_1 & e_0^2 + e_3^2 - \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

と表される。また、オイラーパラメータにより次のような2つの重要なマトリクスを定義することができる。

$$E \equiv [-e, \tilde{e} + e_0 I] = \begin{bmatrix} -e_1 & e_0 & -e_3 & e_2 \\ -e_2 & e_3 & e_0 & -e_1 \\ -e_3 & -e_2 & e_1 & e_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$G \equiv [-e, -\tilde{e} + e_0 I] = \begin{bmatrix} -e_1 & e_0 & e_3 & -e_2 \\ -e_2 & -e_3 & e_0 & e_1 \\ -e_3 & e_2 & -e_1 & e_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2. 2 3次元運動の基本的な拘束

ここで、3次元のbody i と body j についての4つの基本的な拘束を示す。

① body に固定されたベクトルが直交している。

$$\Phi^{d1}(a_i, a_j) = a_i^T a_j = a_i^T A_i^T A_j a_j' = 0 \quad (6)$$

② body に固定されたベクトルと両bodyを結ぶベクトルが直交している。

$$\Phi^{d2}(a_i, d_{ij}) = a_i^T (r_j + A_j s_j^{p'} - r_i - A_i s_i^{p'}) = a_i^T A_i^T (r_j + A_j s_j^{p'} - r_i) - a_i^T s_i^{p'} = 0 \quad (7)$$

③ 2つのbodyが1点を共有している。

$$\Phi^s(P_i, P_j) = r_j + A_j s_j^{p'} - r_i - A_i s_i^{p'} = 0 \quad (8)$$

④ 2つのbodyが一定の距離を保って運動する。

$$\Phi^{ss}(P_i, P_j, C) = d_{ij}^T d_{ij} - C^2 = 0 \quad (9)$$

また、Table.1 に基本拘束の $\Phi_r, \Phi_{r_j}, \Phi_{s_i}, \Phi_{s_j}$ を示す。

Table.1 $\Phi_r, \Phi_{r_j}, \Phi_{s_i}, \Phi_{s_j}$ of the basic restriction

	Φ_r	Φ_{r_j}	Φ_{s_i}	Φ_{s_j}
$\Phi^{d1}(a_i, a_j)$	0	0	$-a_i^T A_i^T A_j \tilde{a}_j'$	$-a_i^T A_i^T A_j \tilde{a}_j'$
$\Phi^{d2}(a_i, d_{ij})$	$-a_i^T A_i^T$	$a_i^T A_i^T$	$(a_i^T \tilde{s}_i^{p'} - d_{ij}^T A_i \tilde{a}_i')$	$-a_i^T A_i^T A_j s_j^{p'}$
$\Phi^s(P_i, P_j)$	-I	I	$A_i \tilde{s}_i^{p'}$	$A_j \tilde{s}_j^{p'}$
$\Phi^{ss}(P_i, P_j, C)$	$-2d_{ij}^T$	$2d_{ij}^T$	$2d_{ij}^T A_i \tilde{s}_i^{p'}$	$-2d_{ij}^T A_j \tilde{s}_j^{p'}$

3. 運動方程式^{(1),(2)}

たがいに拘束を持つnb個のbodyについて

$$r = [r_1^T, r_2^T, \dots, r_{nb}^T]^T \quad (10)$$

$$p = [p_1^T, p_2^T, \dots, p_{nb}^T]^T$$

とすると、運動方程式は

$$\begin{bmatrix} M & 0 & \Phi_r^T \\ 0 & J' & \Phi_{s_i}^T \\ \Phi_r & \Phi_{s_i} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \dot{\omega}' \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F^A \\ n'^A - \tilde{\omega}' J' \omega' \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (11)$$

となる。一方、オイラーパラメータによる表現は

$$\begin{bmatrix} M & 0 & \Phi_r^T & 0 \\ 0 & 4G^T J' G & \Phi_p^T & \Phi_p^{pT} \\ \Phi_r & \Phi_p & 0 & 0 \\ 0 & \Phi_p^p & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{p} \\ \lambda \\ \lambda^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F^A \\ 2G^T n'^A + 8\dot{G}^T J' \dot{G} p \\ \gamma \\ \gamma^p \end{bmatrix} \quad (12)$$

である。式(12)の最後の式はオイラーパラメータの拘束式の加速度方程式である。ここで重要なことは、式(11)を用いて $\dot{\omega}$ を求めても、 ω は積分可能でないことである。そこで、式(12)より $\ddot{r}$ と $\ddot{p}$ を求め、半陰的ルンゲクッタ法を用いることにより $\dot{r}$ と $\dot{p}$ を求めていく。しかし、これだけでは各要素の角速度と角加速度を求めることができないので、次に示す式(13)を用いることによって $\dot{r}$ と $\dot{p}$ を求めていく。

$$\dot{\omega}' = 2G\dot{p}, \quad \dot{\omega}' = 2G\ddot{p} \quad (13)$$

4. 制御法⁽³⁾

本研究では、トラッククレーンモデルにおけるブームの位置決めを2入力型のファジィ制御を用いて行い、吊り荷の振れ止めをSIRMsファジィ制御を用いて行う。

今回用いた2入力型ファジィ制御則を以下に示す。

$$\text{rule } i : \text{if } x_i \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ then } y \text{ is } B_i \quad (14)$$

つぎに、SIRMsファジィ制御則は

$$\text{SIRMs-}i : \{R_i : \text{if } \alpha_i \text{ is } A_i' \text{ then } \beta_i \text{ is } b_j' \}_{j=1}^{m_i} \quad (15)$$

また、2入力型のファジィルールをTable.2に、SIRMsファジィルールをTable.3に示す。さらに2入力型のファジィ制御におけるメンバーシップ関数をFig.1に示す。また、SIRMsファジィ制御におけるメンバーシップ関数をFig.2に示す。ここで、Fig.1、Fig.2において、(a)は前件部のメンバーシップ関数、(b)は後件部のメンバーシップ関数をそれぞれ表している。

Table.2 Double inputs Fuzzy rules

	NB	ZO	PB
NB	NB	NS	ZO
ZO	NS	ZO	PS
PB	ZO	PS	PB

Table.3 SIRMs Fuzzy rules

	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB				
ZO					
PB

Fig.1 Membership function of the Double Inputs Fuzzy sets

Fig.2 Membership function of the SIRMs Fuzzy sets

5. シミュレーション

Fig.3は、本研究で用いたトラッククレーンモデルについて簡略化したモデルである。body 1を基礎部、body 2をブーム部、body 3～5をロープ部、body 6を吊り荷とする。また、Fig.3に示すようにbody 1の重心を全体座標の原点とし、各bodyの重心を局所座標の原点とする。

本研究ではロープ部を3等分して考えることにより、よりロープらしい動きを出せるようにした。Fig.3における関節のうち、body 2とbody 3をつないでいる関節のみ球関節である。残りの関節はすべて回転関節とする。

シミュレーションでは、ブームを30°から60°まで起伏させる。計算時間は10[s]、刻み時間は0.001[s]とした。また、そのときのFig.3における各初期パラメータをTable.4に示す。

Fig.3 Simulation Model of Truck Crane

Table.4 Parameter of Crane Model

	Length	Mass
body 1	0.083[m]	0.6[g]
body 2	0.8[m]	0.194196[g]
body 3~5	0.02[m]	0.03[g]
body 6	0.0294[m]	0.1[g]

Fig.4はブームの重心の変位を示している。ここで、(a)はx方向変位、(b)はz方向変位を表している。また、Fig.5は吊り荷の変位を示している。(a)はx方向変位、(b)はz方向変位を表している。

Fig.4 Displacement of body 2

Fig.5 Displacement of body 6

6. 結言

本研究では、クレーンの3次元運動モデルを構築するため、局所座標系やオイラーパラメータを用いて運動方程式を導出した。また、そのモデルにおいて2入力型のファジィ制御とSIRMsファジィ制御を用いて、ブームの位置決めと吊り荷の振れ止めを行った。シミュレーションの結果、ブームの位置決めおよび吊り荷の振れ止めにおいて良好な結果が得られた。

参考文献

- 1) 遠山茂樹著、機械のダイナミクス、コロナ社 (1993)
- 2) E. J. ハウグ著、コンピュータを利用した機構解析の基本、大河出版 (1996)
- 3) ファジィ制御、日本ファジィ学会 (1993)