

コンクリート運搬用ケーブルクレーンの自動運転システムに関する研究

(第2報, 運搬時の振れ止め制御とリバウンド抑制制御)

Automatic Operation System of Cable Crane for Concrete Dams
(2nd Report, Anti-Sway Control and Anti-Rebound Control)

藤 田 隆 史*・井 上 肇 博*・稲 葉 金 正**
栗 本 雅 裕**・石 井 敏 之**・大 塚 義 一**

Takafumi FUJITA, Toshihiro INOUE, Kanemasa INABA,
Masahiro KURIMOTO, Toshiyuki ISHII and Yoshikazu OTSUKA

1. ま え が き

筆者らは、ダム建設におけるコンクリート運搬・打設の自動運転システムの開発を行なっている、自動化に際しては、コンクリート運搬時のバケットの振れ止めおよびコンクリート放出によって生ずる鉛直方向の振動(リバウンド)抑制制御が重要な要素技術となる。振れ止め制御についてはコンテナクレーンの制御を中心に従来からさまざまな研究がなされている。近年ではほとんどがフィードバック制御によるものであり、トロリーの最大速度に着目した最短時間制御¹⁾、状態フィードバックによるサーボ形振れ止め制御²⁾などが報告されている。

ダム建設で用いられるケーブルクレーンはトロリーの移動距離が数百mと広く、またその速度が最大5m/sと速いためセンシングが難しい。本研究ではセンサとして自動追尾式光学距離計(AP-L1)を使用した。フィードバック制御に用いるのに十分な精度、安全性を有していない。したがって、本システムではオープンループ制御を適用し、荷振れを止めながら最短時間で打設位置に到達する速度パターンをあらかじめ計算し、これにより横行・巻き速度を制御する方式を採用した。また、リバウンド抑制制御は、モデルマッチング法によって制御器を設計し、バケットの変位を用いたフィードバック制御を行う。

本報では、まずコンクリート運搬時の振れ止め制御についてオープンループ制御則を示した後、模型ケーブルクレーンを用いた実験結果と解析結果について述べる。また、リバウンド抑制制御については、解析モデルの導出とシミュレーション結果について述べる。

2. 運搬時の振れ止め制御

2.1 オープンループ制御則

前報で述べた索上をトロリーが走行する3次元モデルは強い非線形であり解析が複雑になるため、運搬時の振れ止め制御については図1のようなもっとも単純な振り子モデルに基づいて考える。

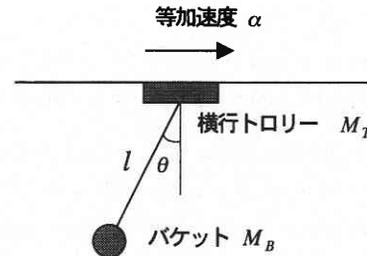


図1 横行トロリーとバケットの解析モデル

横行トロリーが等加速度 α で走行しているときのバケットの運動方程式は次式のようなになる。

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{l}\theta = \frac{\alpha}{l} \dots \dots \dots (1)$$

横行開始時刻においてはバケットは静止しているので式(1)を $t=0$ で $\theta, \dot{\theta}=0$ の初期条件のもとに解くと

$$\theta = \frac{\alpha}{g}(1 - \cos \omega t), \dot{\theta} = \frac{\alpha}{g} \omega \sin \omega t \dots \dots \dots (2)$$

式(2)より加速時間を $\sin \omega t = 0$ が成り立つように、すなわちバケットの固有周期の整数倍時間で加速した後、等速運動へ移行すれば、等速区間でバケットは振動しないことになる。減速もバケットの固有周期の整数倍時間で行えばトロリーが停止した時にバケットは振動しない。

横行・巻下げの制御速度パターンを図2に示す。横行は加速区間、等速区間、減速区間を設け、加減速はバケット

*東京大学生産技術研究所 第2部
**(株)奥村組技術研究所

の固有周期で行う。巻下げに関して最大巻下げ速度に達する時間を T_{ENV} とする。これはモータ特性によって決まる。

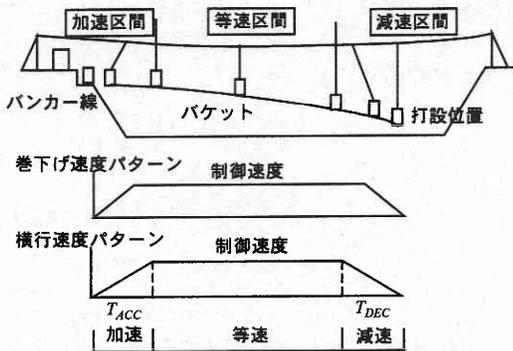


図2 横行・巻下げの制御速度パターン

巻下げ制御速度を V_v とすると制御巻下げ速度に達する時間 T_v は次のようになる。

$$T_v = \frac{T_{ENV}}{V_{UMAX}} V_v \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 V_{UMAX} は最大巻下げ速度、 T_{ENV} は最大巻下げ速度に達する時間である。加速時間および減速時間に巻下げるケーブルの長さ L_{BA} 、 L_{CD} は以下のようになる。

$$L_{BA} = \frac{1}{2} T_v V_v + (T_{ACC} - T_v) V_v = T_{ACC} V_v - \frac{1}{2} T_v V_v \dots\dots (4)$$

$$L_{CD} = \frac{1}{2} T_v V_v + (T_{DEC} - T_v) V_v = T_{DEC} V_v - \frac{1}{2} T_v V_v \dots\dots (5)$$

ただし、 T_{ACC} 、 T_{DEC} はそれぞれ加速時間、減速時間である。また、横行距離 L_{OH} および巻下げ長さ L_{DO} は

$$L_{OH} = \frac{1}{2} T_{ACC} V_H + \frac{1}{2} T_{DEC} V_H + (T_T - T_{ACC} - T_{DEC}) V_H = T_T V_H - \frac{1}{2} T_{ACC} V_H - \frac{1}{2} T_{DEC} V_H \dots\dots (6)$$

$$L_{DO} = T_v V_v + (T_T - 2T_v) V_v = T_T V_v - T_v V_v \dots\dots (7)$$

加速時間・減速時間を横行の加速・減速時間中にケーブルの長さが変化することから、次式のように定義する。

$$T_{ACC} = \frac{1}{2} \left(2\pi \sqrt{\frac{L_B}{g}} + 2\pi \sqrt{\frac{L_B + L_{BA}}{g}} \right) \dots\dots\dots (8)$$

$$T_{DEC} = \frac{1}{2} \left(2\pi \sqrt{\frac{L_C}{g}} + 2\pi \sqrt{\frac{L_C - L_{CD}}{g}} \right) \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 L_B 、 L_C はそれぞれバンカー線およびコンクリート打設ポイント上での振り子の長さである。

式 (8)、(9) を展開し式 (4)、(5) を代入すると

$$T_{ACC}^2 - \left(2\pi \sqrt{\frac{L_B}{g}} + \frac{\pi^2}{g} V_v \right) T_{ACC} + \frac{\pi^2}{2g} T_v V_v = 0 \dots\dots (10)$$

$$T_{DEC}^2 - \left(2\pi \sqrt{\frac{L_C}{g}} + \frac{\pi^2}{g} V_v \right) T_{DEC} - \frac{\pi^2}{2g} T_v V_v = 0 \dots\dots (11)$$

となる。制御速度パターンの計算手順を以下に示す。

- ① 巻下げ速度 V_v を決定すると式 (3) より巻下げ速度に達する時間 T_v が求まる。
- ② V_v 、 T_v がわかったので式 (10)、(11) の2次方程式を解くことにより加速時間 T_{ACC} 、減速時間 T_{DEC} が求まる。
- ③ 式 (4)、(5) から加速時間および減速時間に巻下げるケーブルの長さ L_{BA} 、 L_{CD} が求まる。
- ④ また、式 (7) より目的の場所に到達する時間 T_T が計算される。
- ⑤ 式 (6) から横行速度 V_H が決定される。
- ⑥ ①～⑤を繰り返し最適な横行、巻下げ速度を求める。

2.2 制御実験

横行トロリーを $x = 11.5m$ から $21m$ まで上記のオープンループ制御則で横行、巻下げ速度を決定し運搬した場合の実験結果および解析結果を図3に示す。振れ角は横行トロリーとバケットの座標値から幾何学的に計算した。シミュレーションでは理論どおりに等速区間 ($t = 8.5 \sim 18$ 秒) および横行停止時刻以降 ($t = 22.6$ 秒～) において振れ角はほとんど0になっている。

実験では振れ角について等速区間で高周波数のノイズの

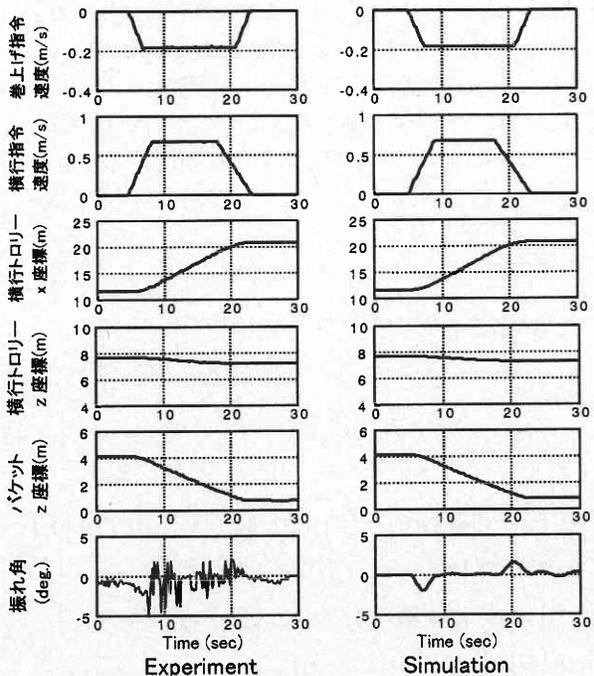


図3 オープンループ制御実験結果

研 究 速 報

ようなものがあらわれているが、これは巻上げ索の長さが変化しているため AP-L1 による測定誤差が大きくなり、その結果、振れ角を求める時の計算誤差が大きくなったためであると考えられる。運搬終了 ($t = 23$ 秒) 後の打設ポイントではバケットの振れ角は 1° (5 cm) 以内におさまっており振れ止めができていることがわかる。

以上の実験およびシミュレーション結果から、上記のオープンループ制御で運搬時のバケットの振れ止めを十分行うことができることが確認できた。

3. 打設後のリバウンド抑制制御

3.1 制御対象の解析モデル

前報で述べた索質点の運動方程式をつりあいのまわりで Taylor 展開し、1 次までとることにより線形化運動方程式 (12) が導かれる。

$$\begin{aligned}
 |M| \{\ddot{X}\} + |C| \{\dot{X}\} + |K| \{X\} = & \{S_x\} \left\{ - (M_B + M_C(t)) \ddot{x}_B \right. \\
 & + \{S_y\} \left\{ - (M_B + M_C(t)) \ddot{y}_B \right. \\
 & + \{S_z\} \left\{ - (M_B + M_C(t)) \ddot{z}_B - M_C(t) g \right\} \\
 & \dots \dots \dots (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \{S_x\} = & (0 \dots \dots 1_{j_1} \dots \dots 0)^T \\
 \{S_y\} = & (0 \dots \dots 1_{N_1+j_1} \dots \dots 0)^T \\
 \{S_z\} = & (0 \dots \dots 1_{2N_1+j_1} \dots \dots 0)^T \dots \dots \dots (13)
 \end{aligned}$$

ただし、 M_B はバケット質量で一定、 $M_C(t)$ はコンクリート質量、 $\{S_x\}$ 、 $\{S_y\}$ 、 $\{S_z\}$ はそれぞれ横行トロリーの x 、 y 、 z 位置を表すベクトルである。打設によって式 (12) 右辺のコンクリート質量 $M_C(t)$ が $M_C(0)$ (実機ケーブルクレーンでは約 10 t) から 0 に急激に減少することで振動が起こる。

モーダルマトリックス $[T]$ および基準座標 $\{Q\}$ を用いて

$$\{X\} = [T] \{Q\} \dots \dots \dots (14)$$

と座標変換すると

$$\begin{aligned}
 \{M^*\} \{\ddot{Q}\} + \{C^*\} \{\dot{Q}\} + \{K^*\} \{Q\} = & \{D_x\} \left\{ - (M_B + M_C(t)) \ddot{x}_B \right. \\
 & + \{D_y\} \left\{ - (M_B + M_C(t)) \ddot{y}_B \right. \\
 & + \{D_z\} \left\{ - (M_B + M_C(t)) \ddot{z}_B - M_C(t) g \right\} \\
 & \dots \dots \dots (15)
 \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned}
 [M^*] = & [T]^T [M] [T], [C^*] = [T]^T [C] [T], [K^*] = [T]^T [K] [T] \\
 \{D_x\} = & [T]^T \{S_x\} = (t_{j_1,1} t_{j_1,2} \dots \dots t_{j_1,3(N_1+N_2)})^T \\
 \{D_y\} = & [T]^T \{S_y\} = (t_{N_1+j_1,1} t_{N_1+j_1,2} \dots \dots t_{N_1+j_1,3(N_1+N_2)})^T \\
 \{D_z\} = & [T]^T \{S_z\} = (t_{2N_1+j_1,1} t_{2N_1+j_1,2} \dots \dots t_{2N_1+j_1,3(N_1+N_2)})^T \\
 & \dots \dots \dots (16)
 \end{aligned}$$

モード減衰マトリックス $[C^*]$ は非対角行列であるが、非対角成分は対角成分に比べて小さいので 0 とし対角マトリックスとして扱った。コンクリート開放によって主として励起される 2 次モードのみを考慮すると運動方程式 (15) は次のようになる³⁾。

$$\begin{aligned}
 m_2^* \ddot{q}_2 + c_2^* \dot{q}_2 + k_2^* q_2 = & t_{j_1,2} \left\{ - (M_B + M_C(t)) \ddot{x}_B \right. \\
 & + t_{N_1+j_1,2} \left\{ - (M_B + M_C(t)) \ddot{y}_B \right. \\
 & + t_{2N_1+j_1,2} \left\{ - (M_B + M_C(t)) \ddot{z}_B - M_C(t) g \right\} \\
 & \dots \dots \dots (17)
 \end{aligned}$$

$$z_{1j_1} = t_{2N_1+j_1,2} q_2 \dots \dots \dots (18)$$

m_2^* 、 c_2^* 、 k_2^* はそれぞれケーブルクレーンの 2 次モード質量、2 次モード減衰係数、2 次モードばね定数である。よって、 $t_{2N_1+j_1,2} = 1$ つまり、横行トロリーの z 座標成分が 1 となるモードベクトルを用いると

$$\begin{aligned}
 m_2^* \ddot{z}_{1j_1} + c_2^* \dot{z}_{1j_1} + k_2^* z_{1j_1} = & t_{j_1,2} \left\{ - (M_B + M_C(t)) \ddot{x}_B \right. \\
 & + t_{N_1+j_1,2} \left\{ - (M_B + M_C(t)) \ddot{y}_B \right. \\
 & + \left\{ - (M_B + M_C(t)) \ddot{z}_B - M_C(t) g \right\} \\
 & \dots \dots \dots (19)
 \end{aligned}$$

水平方向成分にあたる右辺第 1、2 項を無視し、横行トロリーの z 座標 $z_{1j_1} \rightarrow z_s$ 、 $m_2^* = m_s$ 、 $c_2^* = c_s$ 、 $k_2^* = k_s$ と書くと

$$m_s \ddot{z}_s + c_s \dot{z}_s + k_s z_s = - (M_B + M_C(t)) \ddot{z}_B - M_C(t) g \quad (20)$$

となり、図 4 のような 2 質点系モデルとして扱うことができる。

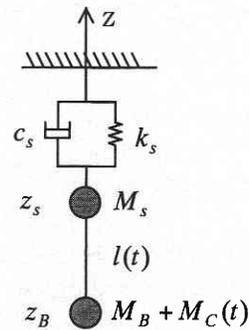


図 4 リバウンド解析モデル

巻き上げ索長を l (索を伸ばす方向を正) とすると

$$z_s = z_B + l \dots \dots \dots (21)$$

これを式 (20) に代入すると

$$\begin{aligned}
 (m_s + m_B + m_C(t)) \ddot{z}_B + c_s \dot{z}_B + k_s z_B = & - m_s \ddot{l} - c_s \dot{l} - k_s l - m_C(t) g \\
 & \dots \dots \dots (22)
 \end{aligned}$$

これは時変系である。制御器設計は式 (22) の左辺第 1 項目

の $m_c(t)$ を打設終了時の値 0 とした時不変系に基づいて行う。

$$\ddot{z}_B + 2\xi\omega\dot{z}_B + \omega^2 z_B = -m'_S \ddot{l} - 2\xi\omega \dot{l} - \omega^2 l - \frac{m_c(t)}{m_S + m_B} g \quad (23)$$

ただし,

$$\omega^2 = \frac{k_S}{m_S + m_B}, \xi = \frac{c_S}{2\sqrt{(m_S + m_B)k_S}}, m'_S = \frac{m_S}{m_S + m_B}$$

3.2 フィードバック制御

制御量はバケット変位, 制御入力は索長 l である。
式 (23) をラプラス変換すると

$$(s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2)L[z_B] = \left(-m'_S s^2 - 2\xi\omega s - \omega^2\right)L[l] - \frac{g}{m_S + m_B}L[m_c(t)] \quad (24)$$

となる。 $L[z_B] \Rightarrow y, L[l] \Rightarrow u, L[m_c(t)] \Rightarrow d$ と書くと伝達関数は

$$P_{uy} = \frac{-m'_S s^2 - 2\xi\omega s - \omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \quad (25)$$

$$P_{dy} = -\frac{g/(m_S + m_B)}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \quad (26)$$

となる。図 5 のようなブロック線図を考え, モデルマッチング法を用いて制御計を設計する。コンクリート質量 $m_c(t)$ を外乱 d として扱う。

図 6 に開ループ伝達関数 P_{dy} および設計された閉ループ伝達関数 W_{dy} を, 図 7 に 3 パターンのコンクリート変化 $m_c(t)$ に対する制御シミュレーション結果を示す。減衰が 2% から 20% となり, いずれの場合も 2 波でほぼ振動を抑制できていることがわかる

4. あとがき

以下に結論をまとめる。

- (1) ケーブルクレーンではセンサの精度, 安全性の問題から, オープンループ制御で運搬時の振れ止めを行い, 模型クレーンを用いた実験および解析結果からその有効性を示した。
- (2) 打設後のリバウンド制御について, モデルマッチング法で制御器を設計し, シミュレーション結果から 2 波でほぼ振動を抑制できることがわかった。

なお, 現在, 開発した自動運転システムは島根県大長見ダム建設現場に導入中である。

(1998 年 5 月 1 日受理)

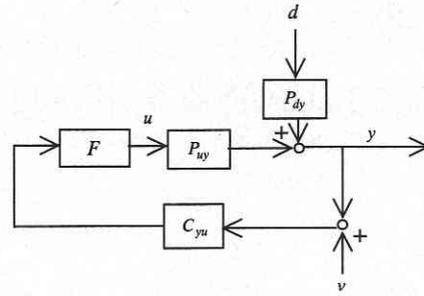


図 5 ブロック線図

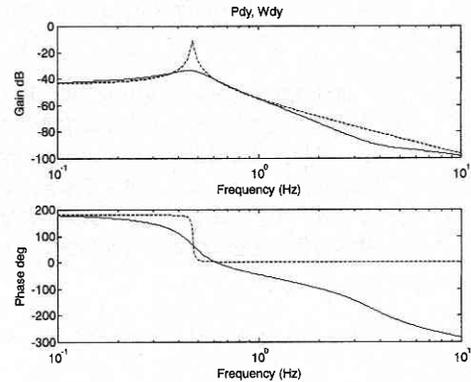


図 6 開ループ伝達関数 P_{dy} および閉ループ伝達関数 W_{dy}

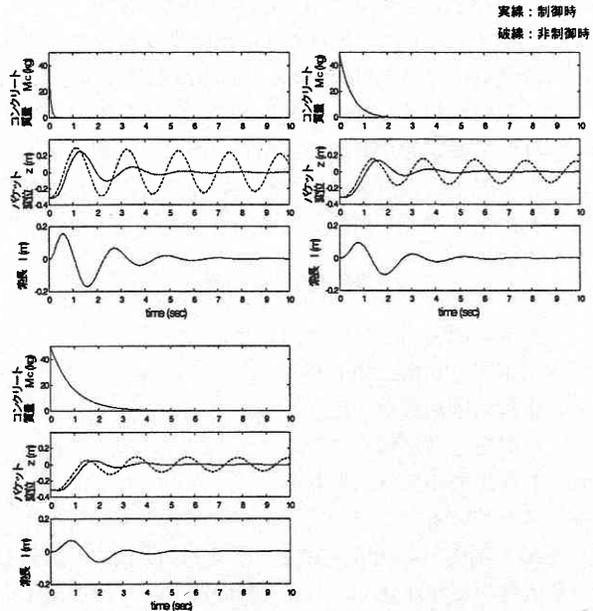


図 7 リバウンド抑制制御シミュレーション結果

参考文献

- 1) 美多, 金井: 計測自動制御学会論文集, 15-6 (1979), 833-838.
- 2) 村田, 中島, 宮田, 西崎: 日本機械学会論文集 C 編, 61-582 (1995), 175-180.
- 3) 藤田, 宮野: 生産研究, 42-12 (1990), 681-683.