1310

メカナムホイールを用いた全方向移動ロボットによる球面振子の制振搬送制御

Damping and transfer control of a spherical pendulum with omni-directional mobile robot having mecanum wheels

○学　和田　嵩（島根大院），　　正　浜口　雅史（島根大院）

Takashi WADA, Graduate School of Shimane University, 1060 Nishi-Kawatsu, Matsue, Shimane, 690-8504 Japan

Masafumi HAMAGUCHI, Graduate School of Shimane University, 1060 Nishi-Kawatsu, Matsue, Shimane, 690-8504 Japan

Key Words: Omni-directional mobile robot, Damping control, Transfer control, Notch-filter, Optimal servo

1.　はじめに

近年，移動機構を持たせたロボットの研究が盛んに行われている．しかし，一般の家庭など複雑で狭い環境で物体を搬送する際，任意の方向への移動が拘束され，その場での旋回もできないロボットでは移動範囲が制限されてしまう．そこで，任意の方向に移動できる全方向移動ロボットの研究が行われている．

本研究では，メカナムホイールを用いた全方向移動ロボットを用い，仮想的な搬送物である球面振子の制振搬送制御を行う．制振搬送制御では，ノッチフィルタによるフィードフォワード制御および最適サーボによるフィードバック制御を用い，ロボットを目標軌道に追従させながら振子の制振を実現することを目的とする．提案する制御系を用いたシミュレーションを行い，本制御系の有効性を検証する．

2.　実験装置

図 1 に実験装置を示す．全方向移動ロボットには 4 つのメカナムホイールを用いる．メカナムホイールでは，車輪の円周に車軸に対し 45°傾けた樽型のフリーローラが取り付けられている．車輪およびフリーローラの回転の連携により全方向への移動が可能となる．ロボットの上に球面振子を載せている．

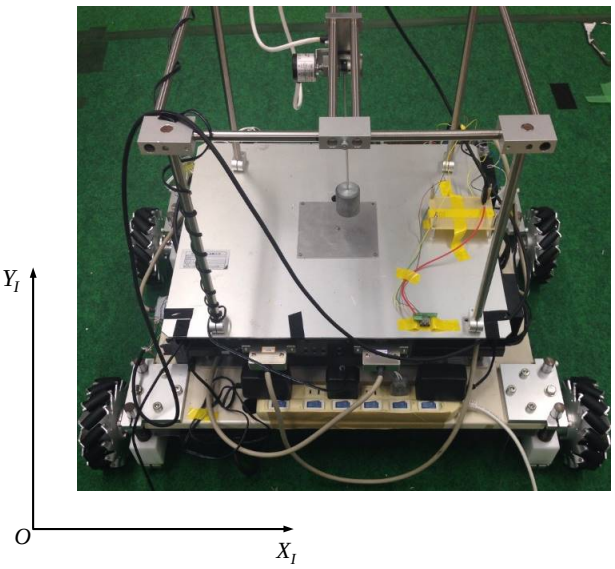


Fig. 1　Experimental apparatus

3.　制振搬送制御

ノッチフィルタ，最適サーボを用いて制振搬送制御系を構築する．制御対象のシステム方程式を式(1)に示す．

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}} &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{y} &= \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

ここで，

$$\boldsymbol{x}=\left[\theta_y,\dot{\theta}_y,\theta_x,\dot{\theta}_x,x_I,y_I,\psi,\dot{\varphi}_1,\dot{\varphi}_2,\dot{\varphi}_3,\dot{\varphi}_4\right]^{\mathrm{T}},\quad \boldsymbol{u}=\left[\dot{\varphi}_{r1},\dot{\varphi}_{r2},\dot{\varphi}_{r3},\dot{\varphi}_{r4}\right]^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{y}=\left[\theta_y,\theta_x,x_I,y_I,\psi,\dot{\varphi}_1,\dot{\varphi}_2,\dot{\varphi}_3,\dot{\varphi}_4\right]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
-\frac{g}{l_y} & -\frac{c_x}{m_p} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{r}{4T_1 l_y} & -\frac{r}{4T_2 l_y} & \frac{r}{4T_3 l_y} & \frac{r}{4T_4 l_y}\\
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & -\frac{g}{l_x} & -\frac{c_y}{m_p} & 0 & 0 & 0 & -\frac{r}{4T_1 l_x} & \frac{r}{4T_2 l_x} & \frac{r}{4T_3 l_x} & -\frac{r}{4T_4 l_x}\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r}{4} & \frac{r}{4} & -\frac{r}{4} & -\frac{r}{4}\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{r}{4} & \frac{r}{4} & \frac{r}{4} & -\frac{r}{4}\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -D & -D & -D & -D\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_1} & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_2} & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_3} & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_4}
\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 0\\
\frac{rK_1}{4T_1 l_y} & \frac{rK_2}{4T_2 l_y} & -\frac{rK_3}{4T_3 l_y} & -\frac{rK_4}{4T_4 l_y}\\
0 & 0 & 0 & 0\\
\frac{rK_1}{4T_1 l_x} & -\frac{rK_2}{4T_2 l_x} & -\frac{rK_3}{4T_3 l_x} & \frac{rK_4}{4T_4 l_x}\\
0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0\\
\frac{K_1}{T_1} & 0 & 0 & 0\\
0 & \frac{K_2}{T_2} & 0 & 0\\
0 & 0 & \frac{K_3}{T_3} & 0\\
0 & 0 & 0 & \frac{K_4}{T_4}
\end{bmatrix},\quad
\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}
1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&1&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1
\end{bmatrix},$$

$$D=\frac{\sqrt{2}l\cos\left(\pi/4-\alpha\right)\left(2m_w+m_r\right)r}{4\left\{I_b+12l^2m_w\cos^2\left(\pi/4-\alpha\right)\right\}} \tag{2}$$

であり，θ_y，θ_x：Y_I，X_I 軸回りの振子の振れ角，x_I，y_I：X_I，Y_I 方向のロボット位置，ψ：ロボットの回転角，$\dot{\varphi}_i$ (i=1~4)：ホイールの角速度，$\dot{\varphi}_{ri}$：ホイールの目標角速度，r：ホイールの半径，l：ロボットの中心からホイールまでの長さ，m_p：錘の質量，m_r：ロボットの全質量，m_w：ホイールの質量，I_b：ロボットの慣性モーメント，α：ロボットの幾何学的中心 G からホイール中心 w_1 へのベクトルと X_R 軸のなす角，l_x，l_y：X_I，Y_I 軸回りの振子長，g：重力加速度，c_x，c_y：X_I，Y_I 軸方

向の粘性係数，K_i，T_i：各駆動系のゲインと時定数である．なお，本研究では，サンプリング時間 T_s を 10 ms とした離散時間システムを用い，$K_{1,3}$=0.763，$K_{2,4}$=0.790，$T_{1,3}$=0.149[s]，$T_{2,4}$=0.125[s]としてシミュレーションを行った．

振子の制振制御には，式(3)に示すノッチフィルタを用いる．

$$F_N(s)=\frac{s^2+2\zeta_n\omega_n s+\omega_n{}^2}{s^2+\omega_n s+\omega_n{}^2},\quad \omega_n>0,\quad 0<\zeta_n\le\frac{1}{\sqrt{2}} \tag{3}$$

このフィルタは振動数ω_nで下向きのピークを持ち，ζ_n=0.0001 のとき，$0.9\omega_n<\omega_n<1.1\omega_n$ の範囲でゲインを−20 dB 以下にできるため，振子の固有角振動数での振動を抑えるために用いる．図 2 に示すように，このフィルタによりロボットの加速度 $\boldsymbol{a}$ を整形し，フィードフォワード入力 $\boldsymbol{u}_f$（ホイールの角速度）を求める．

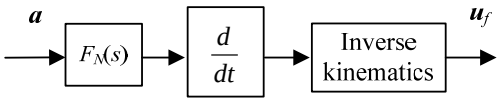


Fig. 2　Block diagram of feedforward control system

ロボットを目標軌道に追従させるため，最適サーボによるフィードバック制御を付加した(1)．ロボットの位置・姿勢偏差を $\boldsymbol{e}(k)$とした状態量 $\boldsymbol{X}(k)=[\boldsymbol{e}(k),\ \Delta\boldsymbol{x}(k)]^{\mathrm{T}}$ と入力の 1 階差分値$\Delta\boldsymbol{u}(k)$を用いた拡大系に対し，最適レギュレータ理論を適用し，最適サーボゲイン $\boldsymbol{F}=[\boldsymbol{F}_e\ \ \boldsymbol{F}_x]$を得る．本研究では 2 次形式評価関数の入力に対する重み行列を $\boldsymbol{H}$=diag(1，1，1，1)とし，状態に対する重み行列 $\boldsymbol{Q}$ は遺伝的アルゴリズム(GA)により最適化する．$\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{Z}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}\boldsymbol{Z}$ とし，$\boldsymbol{Z}$，$\boldsymbol{W}$ を次式で与えた．

$$\boldsymbol{Z}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{3\times3} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{C}_Z\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{W}=\mathrm{diag}\left(q_1,\ q_2,\ q_3,\ q_4,\ q_5\right) \tag{4}$$

ここで，

$$\boldsymbol{C}_Z=\begin{bmatrix}1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0\end{bmatrix}$$

である．なお，GA の適合度 J は

$$J=1/(J_1+p)$$

$$J_1=\alpha\times\left(\frac{\int_0^{t_f}|\theta_y|dt}{\theta_{y\max}t_f}+\frac{\int_0^{t_f}|\theta_x|dt}{\theta_{x\max}t_f}\right)+(1-\alpha)\times\left(\frac{\int_0^{t_f}|e_x|dt}{e_{x\max}t_f}+\frac{\int_0^{t_f}|e_y|dt}{e_{y\max}t_f}+\frac{\int_0^{t_f}|e_\psi|dt}{e_{\psi\max}t_f}\right) \tag{5}$$

で与えた．ここで，t_f：シミュレーション終了時間，p：ペナルティ値であり，α =0.9 とした．ホイールの角加速度および角速度が制限値を超えた場合は p=10，それ以外では p=0 とした．

制御系のブロック線図を図 3 に示す．ここで，$\boldsymbol{C}_{3,5}$: $\boldsymbol{C}$ の第 3~5 行からなる行列，$\boldsymbol{a}_d$：外乱である．フィードバック入力 $\boldsymbol{u}_b$ は外乱が入力された場合にのみ生じる．

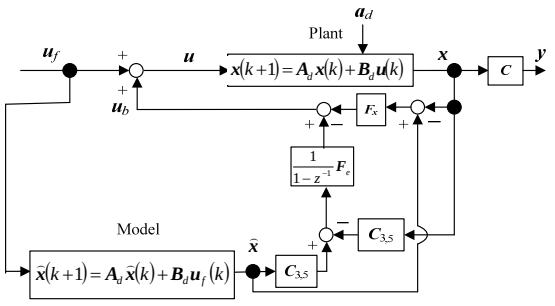
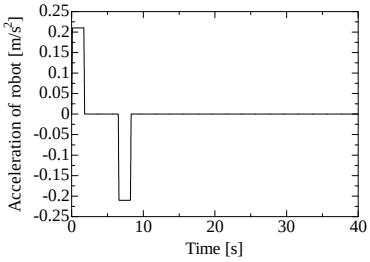


Fig. 3　Block diagram of control system

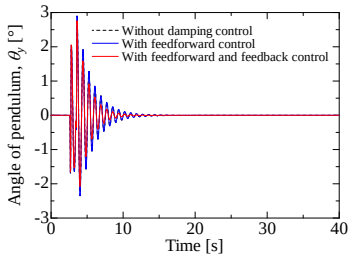
4.　制振搬送シミュレーション結果

本研究で構築した制御系を用いて制振搬送シミュレーションを行った．搬送加減速度はY_I軸方向に最大0.21 m/s²（最大速度0.357 m/s，距離 2.32m）である．また，段差乗り越えを想定した外乱速度を与えた．なお，GAを5回試行して求まった重み行列は，$\boldsymbol{W}$=diag(2.11×10^{-4}，3.91×10^{-6}，8.01×10^{-3}，5.31×10^{1}，7.77×10^{-3})である．

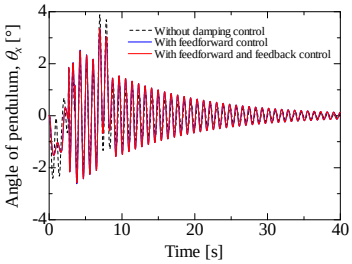
図4にシミュレーション結果を示す．同図(a)に走行加速度を示す．同図(b)，(c)はそれぞれY_I，X_I軸回りの振子の振れ角である．同図(b)より，外乱によって励起された振子の振動を最適サーボにより抑えていることがわかる．また，同図(c)より，ロボットの発進時に生じる振動をフィードフォワード制御により抑えていることがわかる．しかし，外乱が加わると制振制御を行わない場合の方が振動が小さい．これは実験装置のモータのトルク不足により大きな角加速度が入力できず，制約条件が厳しくなることから重み行列の値が非常に小さくなるため，フィードバック制御が有効に働かないことが原因である．また，機構の特性上，モータの回転が正転から逆転に切り替わる入力が必要となり制約条件を満たすことが難しい．したがって，モータのトルク不足を解消する，もしくは，吸振器と併用することで制振性能が向上すると考えられる．



(a)　Acceleration of robot in Y_I-axis



(b)　Angle of pendulum, θ_y



(c)　Angle of pendulum, θ_x

Fig. 4　Simulation results of damping control

5.　まとめ

提案した制御系の有効性を制振搬送シミュレーションにより確認することができた．

文献

(1)　土谷武士, 江上正, ディジタル予見制御, 産業図書(1992), pp. 21-27.