E-6

ロボコースターの客席運動とレール抗力の動的干渉に関する研究

Study on Dynamic Interactions between Seat Motions and Rail Reactions of Robocoasters

○鶴見洋平[1]，　羽多野正俊[2]

*Youhei Tsurumi[1], Masatoshi Hatano[2]

Abstract: In robocoasters, there are dynamic interactions between seat motions and rail reactions. Thus, it is necessary to analyze dynamic effects quantitatively. In this paper, a model of robocoaster is shown at first. Then, the dynamic interactions are discussed by performing simulations.

1. 緒言

遊園地などに設置されるアトラクションであるローラーコースターは人が搭乗した車両を高所に持ち上げ，力学的エネルギーを利用して様々な斜面やループを走行し，スリルを楽しむ乗り物である．近年，より複雑な動きによるスリルを楽しむために，地上に固定されたロボットマニピュレータのハンド部に客席を取り付けたロボコースターが登場している．さらに，ローラーコースターにロボットマニピュレータを搭載したロボコースターが開発されつつある. ロボコースターは車両部とマニピュレータ部が動的干渉しながら運動するため, 車両の運動にマニピュレータの運動が印可し，客席部の運動よりレールに印可する力が変化する．よって，レールに与える動的影響について解析する必要があると考える．

本報告では，客席運動の変化とレールへの作用力である抗力の動的干渉について，シミュレーションにより考察した結果を述べる．

2. シミュレーションモデル

著者らは，凹凸路面を走行する移動マニピュレータについて，路面形状がハンドに与える動的影響と制御手法の研究を行ってきた[1]. このモデルを基にして Fig. 1 に示すようなモデルを考える．ロボコースターは２次元垂直平面内を運動するモデルを考える。図中の$\sum_i (i = 0, \dots, n)$は第 i リンクに取り付けられたリンク座標系である．走行台車をリンク0と呼ぶ．x 及び z 絶対座標系$\sum_W$の原点から$_{W}x$軸及び$_{W}z$軸方向のリンク0座標系$\sum_0$の原点位置，α はリンク0のピッチ角，l_iはリンク i の長さ，l_{gi}はリンク i の$\sum_i$から重心までの長さ，m_iはリンク i の質量，I_iはリンク i の重心回りの慣性モーメント，θ_iは車載マニピュレータの関節 i の回転角，$f(x)$はレール形状を表す．定式化した運動方程式を(1)式に示す．

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{p}} + \boldsymbol{h} + \boldsymbol{g} = \boldsymbol{\tau}_M + \boldsymbol{U}_t f_t + \boldsymbol{U}_n \boldsymbol{U}_m \boldsymbol{\gamma}$$

$$\boldsymbol{\gamma} = [f_F, f_R]^T = \boldsymbol{R}^{-1}\left[-\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{p}}\left(\frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial \boldsymbol{p}}\dot{\boldsymbol{p}}\right)\dot{\boldsymbol{p}} + \frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial \boldsymbol{p}}\boldsymbol{M}^{-1}\{\boldsymbol{h} + \boldsymbol{g} + \boldsymbol{\tau}_M - \boldsymbol{U}_t f_t\}\right] \quad (1)$$

ここで，$\mathbf{R} = (\partial \boldsymbol{C}/\partial \boldsymbol{p})\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{U}_n$, f_n及びτ_αはそれぞれ拘束力及び拘束トルク，$\boldsymbol{\tau}_M$は車載マニピュレータへの入力トルク，$\mathbf{C}$は拘束条件，$\mathbf{M}$，$\mathbf{h}$，$\mathbf{g}$はそれぞれ慣性行列，遠心・コリオリ力ベクトル，重力ベクトル，$\mathbf{p} = [x, z, \alpha, \boldsymbol{\theta}]^T$は一般化座標ベクトル，$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \dots \theta_n]^T$である．$f_t$は任意の走行駆動力であり，一般的なコースの最高地点をスタート地点として自由落下に運動する場合は$f_t = 0$であるが, アトラクションの演出上任意の走行速度を定めたい場合や，前述のリニアモータや圧縮空気等により運動エネルギーを印可される場合はその力がf_tにより表現される．

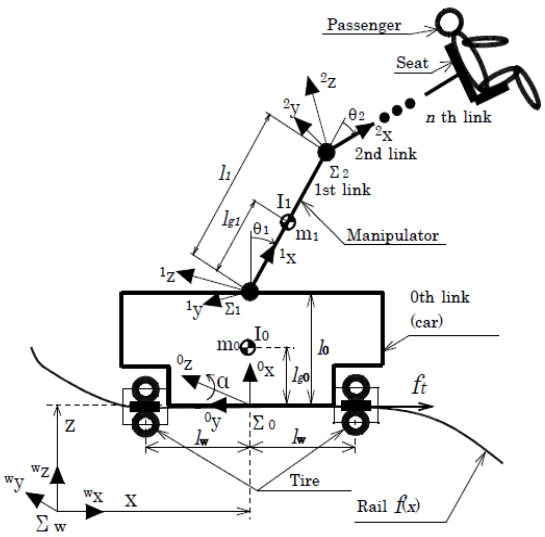


Fig. 1 Robocoaster model

１：日大理工・学部・精機、２：日大理工・教員・精機

3. シミュレーション

3.1 シミュレーション条件

シミュレーションには２リンクの車載マニピュレータを持つロボコースターとし，各物理パラメータは，$m_0 = 5000[kg]$, $m_1 = 1500[kg]$, $m_2 = 1500[kg]$, $l_0 = 1.0[m]$，$l_1 = 1.5[m]$，$l_2 = 1.5[m]$，$l_{g0} = 1.0[m]$，$l_{g1} = 0.75[m]$，$l_{g2} = 0.75[m]$，$l_\omega = 1.0[m]$，と設定した．さらに客席質量として$m_p = 260[kg]$とした．客席質量はリンク２の一部として取り扱い，リンク２単体の重心位置と慣性モーメントに印可するとして扱った．

客席部の運動は，目標を円運動として与える．コースターのレール上の走行距離s[m] に対し，目標走行距離s_dを$s_d = v_d$と与えた．ここで$v[m/s]$はコースターのレール上の走行速度であり，v_dは目標速度である．

これらの運動を行わせるために，走行駆動力f_t，車載マニピュレータへの入力トルクτ_1，τ_2をそれぞれ次式の PD 制御により算出し与えた．

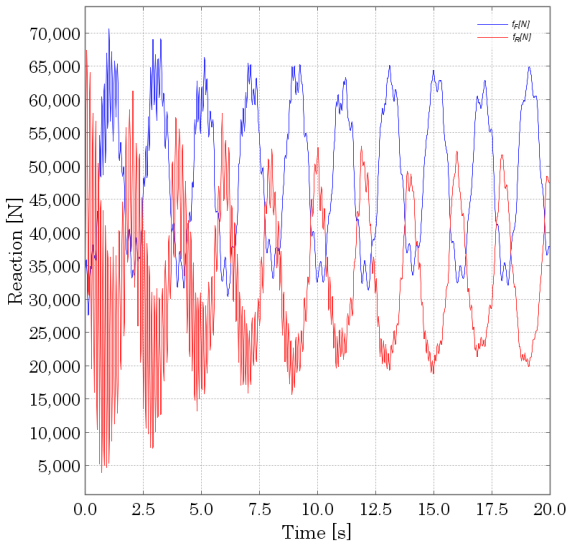
$$
\begin{aligned}
f_t &= k_{p0}(s_d - s) - k_{d0}(v_d - v) \\
\tau_i &= k_{pi}(\theta_{id} - \theta_i) - k_{di}(\dot{\theta}_{id} - \dot{\theta}_i)
\end{aligned}
\tag{4}
$$

リンク１および２の目標角度$\theta_i (i = 1,2)$および目標角速度$\dot{\theta}_i$は客席の目標軌道を逆運動学により変換し算出した．また，比例ゲイン・微分ゲインは，誤差に対し過敏にならないように設定した．ロボコースターの運動がレールに与える影響は，客席運動やレール形状の変化に依存する．本報告では，レール形状を水平とし，目標走行速度$v_d = 1.0$，$5.0[m/s]$とし、客席運動についてはT = 2[s]とした場合のシミュレーション結果を示す．

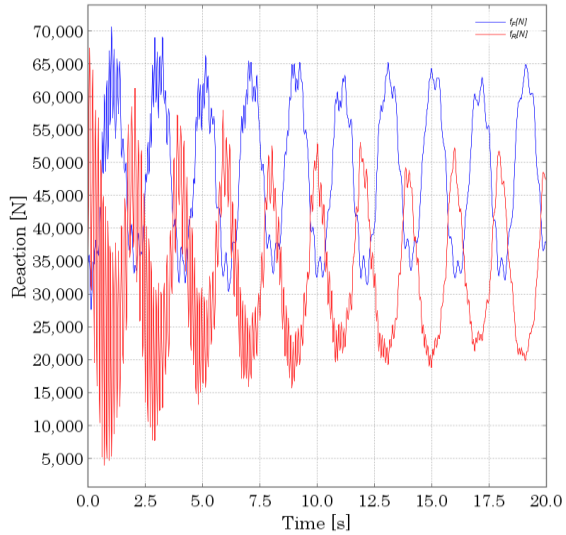
3.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果について，抗力の時間応答を Fig. 2(a)(b)に示す．(a)図は走行目標速度$v_d = 1.0[m/s]$，(b)図は走行目標速度$v_d = 5.0[m/s]$での時間応答を表す．ここで，抗力f_F, f_Rはロボコースターがレールから受ける抗力を表している．

これはコースターがレールに対して与える作用力に対する反作用力であるが，レールから見ると凹ませる力は正である方が自然であるため，本報告ではf_F, f_Rとして評価している．Fig. 2(a)(b)において，レール形状が水平の場合，走行速度が変化しても時間に対する抗力の応答が変わらないことが分かる．これはレール形状が水平のため，傾斜角 α が変化しないからであると考えられる．



(a) $v_d = 1.0[m/s]$



(b)$v_d = 5.0[m/s]$

Fig. 2 Relationship between traveling speed and reaction from rails

4. 結言

本報告では，垂直２次元平面内を運動するロボコースターについて，シミュレーションにより客席運動の変化を走行速度の変化として与え，ロボコースターがレールに与える動的干渉の変化について定量的に示した．今後は，３次元空間内を運動するモデルへの拡張や，小型の実験装置を製作し，シミュレーションモデルの妥当性について研究を進める予定である．

参考文献

[1] 羽多野正俊，大住剛，小原治樹，見浪護：移動マニピュレータの凹凸路面走行時における外乱の影響，日本ロボット学会誌, vol.20, No.8, pp-883-892, 2002.