

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560245

研究課題名（和文） 高速移動ロボットの振動抑制技術の開発

研究課題名（英文） Development of a vibration prevention controller for high speed mobile robots

研究代表者

大屋 勝敬 (OOYA MASAHIRO)

九州工業大学・工学研究院・准教授

研究者番号：40203947

研究成果の概要（和文）： 2輪移動体モデルを基に、タイヤの撓みの計測を必要としない車体振動抑制技術を開発した。このことを実現するため、車体に加わる力、車体上下・ピッチング加速度、タイヤ上下加速度、ならびに、ばねの伸びの計測値に基づく状態推定器を開発した。開発された技術を用いた移動体システムには以下の特徴がある。①車体上で指定された場所の振動を最小とすることができる。②振動が最小となる場所を、コントローラの再設計無しで、簡単に移動させることができる。

研究成果の概要（英文）： Based on the two wheels mobile model, we developed a vibration prevention controller for the body without using the tire deflection. To achieve the objective, we proposed a state observer using the measurements of the force added to the body, the bouncing acceleration and the pitching acceleration of the body, the bouncing acceleration of the tire and the stroke of the suspension. In the mobile systems using the developed controller, there exist the following good properties. ① At the specified location on the body, the vibration prevention becomes best. ② The best location where the vibration prevention becomes best can be moved easily without redesigning the other controller.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：振動制御

## 1. 研究開始当初の背景

災害地などの人間が容易に入り込めない場所において活躍する移動ロボットにおいては、特に高速移動しながら情報を収集しよ

うとした場合、車体に激しい振動が発生する。車体が振動した場合、搭載したカメラ映像が振動することにより遠隔地で操作しているオペレータの疲労が極度に悪化することに

なり、最悪の場合転倒する恐れもある。また、車体の振動により、移動ロボットに搭載された計測器において大きな計測誤差が発生する危険性や精密機器に損傷が生じる危険性がある。

個々の計測器に対して専用の制振装置を装備する手法も考えられるが、この手法を用いて高い制振性能を実現するには各制振装置に高出力のアクチュエータを装着する必要がある。このとき、制振装置は大きく、かつ、重くなる。このため、障害物が多く、どうしても狭い領域を自在に動く必要のある小型情報収集ロボットには不向きな手法である。

## 2. 研究の目的

研究の背景で述べた問題を解決するための制振技術の開発を目指し、以下の技術の開発を目的とする。

(1) 平成20年度までに研究代表者が開発している振動抑制手法を基にして、タイヤ撓みの計測を必要としない制振コントローラ的设计法を開発する。なお、平成20年度までに研究代表者が開発した研究成果においては、移動体に装備されているサスペンションの変位情報、タイヤ撓み、車体ならびに車軸の上下加速度情報を必要とする。しかし、車体重量、車体重心位置等に未知変動が存在したとしても、振動が最小となる場所を簡単に移動できるという特徴がある。

## 3. 研究の方法

(1) 車体に加わる上下力、車体加速度、車軸の上下加速度、サスペンションの変位の計測情報を利用して、タイヤ撓みなどの必要な信号の生成法を開発する。

(2) 生成された信号を用いた振動抑制法を開発する。

- ① (1)の結果を従来法へ適用した手法の開発を行う。
- ② 4輪移動体モデルへの拡張を目指した設計法を開発する。
- ③ 入力飽和を考慮したロバスト制御法の開発を行う。

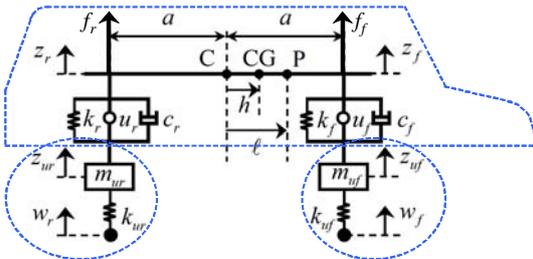


図1 2輪移動体モデル

表1 各パラメータの説明

C, CG	車体中心, 重心
$z_{cg}, \theta$	重心位置における上下変位, ピッチング
$z_f, z_r$	前後輪軸上の車体上下変位
$z_{uf}, z_{ur}$	前後輪タイヤの上下変位
$w_f, w_r$	前後輪タイヤに加わる路面外乱
$v$	進行方向速度
$m, i_c$	車体質量, 慣性モーメント
$a$	車体長の半分
$h, l$	中心から重心までの距離, 中心から指定位置までの距離
$m_{uf}, m_{ur}$	前後輪タイヤ質量
$k_f, k_r$	前後輪サスペンション定数
$c_f, c_r$	前後輪ダンパ定数
$k_{uf}, k_{ur}$	前後輪タイヤ剛性
$f_f, f_r$	前後輪軸上の車体に加わる力
$u_f, u_r$	前後輪アクティブサスペンション力

## 4. 研究成果

(1) 図1に、本稿で考える2輪移動体モデルを示す。なお、各記号の意味は、表1に示す。本システムにおいて、平成20年度までに研究代表者が開発した振動抑制手法を利用するためには、つぎの状態が必要となる。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{w}(t) &= [\ddot{w}_f(t), \ddot{w}_r(t)]^T \\ x_2(t) &= H^{-1}[z_f(t) - w_f(t), z_r(t) - w_r(t)]^T, \quad \dot{x}_2(t) \\ x_u(t) &= [z_{uf}(t) - w_f(t), z_{ur}(t) - w_r(t)]^T, \quad \dot{x}_u(t) \\ d(t) &= H[\ddot{z}_r(t), \ddot{z}_f(t)]^T \end{aligned} \right\} H = \begin{bmatrix} 1 & a \\ 1 & -a \end{bmatrix}$$

開発目的を達成するために次の仮定を設ける。

- A1 上下加速度  $\ddot{z}_f(t), \ddot{z}_r(t), \ddot{z}_{uf}(t), \ddot{z}_{ur}(t)$  を計測している。
- A2 車体に加えられる力  $f(t) = [f_f(t), f_r(t)]^T$  を計測している。
- A3 サスペンション変位  $x_s(t) = [z_f(t), z_r(t)]^T - [z_{uf}(t), z_{ur}(t)]^T$  を計測している。
- A4 車体の半分の長さ  $a$ , 前後輪タイヤ剛性  $k_{uf}, k_{ur}$  および前後輪バネ下質量  $m_{uf}, m_{ur}$  の値は既知であり、これら以外のパラメータ値は不明である。

仮定より、状態  $d(t)$  は計測可能である。また、サスペンション加速度が計測可能であることよりタイヤ撓み

$$\left. \begin{aligned} x_u(t) &= K_u^{-1} \left[ \ddot{x}_s(t) - (Hd(t) + M_u^{-1}f(t)) \right] \\ M_u &= \text{diag}[m_{ur}, m_{ur}] \\ K_u &= M_u^{-1} \text{diag}[k_{ur}, k_{ur}] \end{aligned} \right\}$$

も利用可能な信号となる。以上の信号が利用可能であることより、状態

$$\eta(t) = [\eta_1(t)^T, \eta_2(t)^T, \eta_3(t)^T]^T = [\dot{x}_s(t)^T, (H\dot{x}_z(t))^T, \ddot{w}(t)^T]^T$$

を推定することができれば、必要な信号が全て利用可能となる。このことを実現するために次の状態推定器を開発した。なお、次の推定器により状態が推定できることを理論的に証明している。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{\eta}}_1(t) &= \alpha x_s(t) + \zeta_1(t), \\ \zeta_1(t) &= \ddot{x}_s(t) - \alpha \hat{\eta}_1(t), \quad \zeta_1(0) = -\alpha x_s(0) \\ \dot{\hat{\eta}}_2(t) &= 2\alpha p_2(t) + \zeta_2(t), \quad p_2(t) = x_s(t) + x_u(t) \\ \dot{\zeta}_2(t) &= -2\alpha \hat{\eta}_2(t) + Hd(t) - \hat{\eta}_3(t) \\ \dot{\hat{\eta}}_3(t) &= -3\alpha^2 p_2(t) + \zeta_3(t) \\ \dot{\zeta}_3(t) &= 3\alpha^2 \hat{\eta}_2(t) \\ \zeta_2(0) &= 2\alpha p_2(0), \quad \zeta_3(0) = 3\alpha^2 p_2(0) \end{aligned} \right\}$$

ここで、 $\alpha$  は推定器の性能を改善するために導入した設計パラメータである。

## (2) 振動抑制法の開発結果

① 推定器によって推定される状態を用いて開発した振動抑制制御システムを図2に示す。平成20年度までに研究代表者が開発している振動抑制手法に上記の推定信号を用いた制御システムに拡張したシステムである。なお、理想移動体は、振動が最小となる場所を簡単に移動できるという特徴がある。

数値シミュレーション実験を通して、計測信号に計測精度に起因するノイズが重畳している場合の制御性能への影響を検討した。その結果、人間が不快感を感じる1Hz~5Hz近傍の振動抑制性能にはほとんど影響が無いことを確認した。

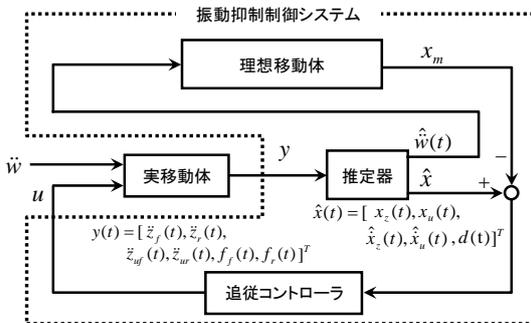


図2 振動抑制制御システム

② 2輪移動体における制御システムの安定解析では、部分システムの安定性をフルビッツの安定判別法を用いて解析した。しかし、4輪移動体の場合には同じ部分システムの次数が高くなるため、フルビッツの安定判別法を用いた解析は不可能となる。この問題を解決するため、リアプノフ方程式を用いたあらたな安定解析法を提案した。この安定解析法を用いることにより、4輪移動体に対しても強いロバスト性能を有する振動抑制法を提案した。①で開発した推定手法をこの方法に応用することにより、より実際の移動体における振動抑制制御を行うことができる。

③ 実際の移動体の振動をアクティブサスペンション等を用いて抑制しようとした場合、アクチュエータに存在するは操作量飽和が問題となる。この操作量飽和を無視してコントローラを設計しても、所期の制御性能が得られない場合がある。最悪の場合、制御システム全体が不安定になってしまう場合もある。この問題を解決し、かつ、強いロバスト性能を有する振動抑制制御法の開発を目指し、操作量飽和を考慮した新しい適応コントローラ的设计手法を提案した。この手法を応用することにより、操作量飽和に起因する制御性能劣化を伴わない振動抑制技術が開発できる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計10件)

- ① Katsuhiro Okumura, Masahiro Oya, Hidetaka Ohta, Hideki Wada, On the Influence of Measurement Noises for Ride Comfort in Active Vehicle Suspension Systems, Proceedings of the International Symposium on Advanced Vehicle Control, September 9-12, Seoul, Korea, 2012 (掲載決定), (査読有).
- ② Bo Zhou, Tasuku Eto, Hiroshi Shibata, Masahiro Oya, Adaptive Oscillation Control Scheme for a Wheeled Mobile Robot, The Seventeenth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2012, Oita, Japan, January 19-21, 2012, pp. 85-88, (査読有).
- ③ Masahiro Oya, Ryotaro Okura, Hiroshi Shibata, and Katsuhiro Okumura, Robust control of vehicle active suspension systems, ICIC Express Letters, Vol. 6-4, 2011, pp. 1019-1026, (査読有).
- ④ Natsuki Takagi, Kazuya Sato, Masahiro Oya, A modified adaptive control scheme in the presence of input saturation, International

- Journal of Advanced Mechatronic Systems, Vol. 3, No. 3, 2011, pp. 168-180, (査読有).
- ⑤ Katsuhiko Okumura, Hideki Wada, Yuichiro Taira and Masahiro Oya, Robust Active Suspension Control of Vehicles with Measurement Noises, Proceedings of the 16-th International Symposium on Artificial Life and Robotics 2011, Beppu, Japan, January 27-29, 2011, pp.126-129, (査読有).
  - ⑥ Jinxin Zhuo, Qiang Wang and Masahiro Oya, Adaptive Control Scheme for MI-MO Systems with Input Saturations, Proceedings of the 2011 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, Zhengzhou, China, August 11-13, 2011, pp.325-330, (査読有).
  - ⑦ Katsuhiko Okumura, Masahiro Oya, Hideki Wada, Robust Ride Comfort Control of Vehicles without Measurements of Tire Deflection, International Journal of Artificial Life and Robotics, Vol.15 No.2, 2010, pp.133-137, (査読有).
  - ⑧ Natsuki Takagi, Masahiro Oya, Qiang Wang and Toshihiro Kobayashi, Adaptive control scheme achieving smooth control input in the presence of input saturation, International Journal of Advanced Mechatronic Systems, Vol. 2-4, 2010, pp. 225-235, (査読有).
  - ⑨ Yasutaka Tsuchida, Masahiro Oya, Natsuki Takagi, and Qiang Wang, Robust Oscillation Control of Wheeled Mobile Robots, International Journal of Artificial Life and Robotics, vol.14, 2009, pp. 357-361, (査読有).
  - ⑩ Katsuhiko Okumura, Masahiro Oya, Masashi Nagae, Hidetaka Ota and Hideki Wada, Active Suspension Control Scheme for vehicles without Measurements of Tire Deflection, Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, Daejeon, Korea, December 15-18, 2009, pp. 153-158, (査読有).

[学会発表] (計10件)

- ① 黒瀬貴文, 衛藤将, 大屋勝敬, 和田英樹, 車輪型移動ロボットの適応振動制御, 計測自動制御学会九州支部学術講演会予稿集, 12/3-12/4, 大分, 2011, pp. 65-68.
- ② 古賀裕幸, Jinxin Zhuo, 柴田寛史, 大屋勝敬, 入力飽和が存在する多入出力システムのモデル規範型適応制御, 計測自動制御学会九州支部学術講演会予稿集, 12/3-12/4, 大分, 2011, pp. 1-4.
- ③ 江藤将, 奥村克博, 大多英隆, 大屋勝敬, 車輪型移動ロボットの適応振動抑制制御,

運動と振動の制御シンポジウム講演論文集, 6/29-7/1, 長野, 2011, pp. 626-629.

- ④ 奥村克博, 和田秀樹, 大多英隆, 大屋勝敬, 計測外乱を有する車両のアクティブサスペンション制御, 第11回制御部門大会前刷集, 3/16-3/18, 沖縄, 2011.
- ⑤ 江藤 将, 奥村克博, 和田秀樹, 大多英隆, 大屋勝敬, 計測外乱が存在する場合の車両の乗り心地制御性能, 計測自動制御学会九州支部学術講演会予稿集, 12/4-12/5, 宮崎, 2010, pp. 65-66.
- ⑥ 高木夏樹, 田丸慎悟, 大屋勝敬, 入力飽和が存在するシステムに対するある改良型適応制御法, 計測自動制御学会九州支部学術講演会予稿集, 12/4-12/5, 宮崎, 2010, pp. 31-32.
- ⑦ 奥村克博, 和田秀樹, 大屋勝敬, タイヤの撓み計測を必要としない車両のロバスタクティブサスペンション制御, 電気学会 電子・情報・システム部門大会講演論文集, 9/2-9/3, 熊本, 2010, pp. 1185-1190.
- ⑧ 千々岩大輔, 長江政志, 和田秀樹, 大屋勝敬, タイヤの撓みの測定値を必要としない車両のアクティブサスペンション制御, 第28回計測自動制御学会九州支部学術講演会前刷集, 11/29-11/30, 福岡, 2009, pp. 51-54.
- ⑨ 長江政志, 高木夏樹, 奥村克博, 大屋勝敬, 入力飽和を有するシステムの適応制御 - 相対次数と同じ数の出力微分値が利用可能な場合 -, 第25回自動制御連合講演会, 11/21-11/22, 大阪, 2009, D1-4(6 ページ).
- ⑩ 奥村克博, 長江政志, 高木夏樹, 大屋勝敬, 移動ロボットの適応振動抑制制御, 運動と振動の制御 シンポジウム講演論文集, 9/2-9/4, 福岡, 2009, pp. 265-268.

[その他]

ホームページ等

<http://lab.cnt1.kyutech.ac.jp/~oyalab/oyalab.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大屋 勝敬 (OYA MASAHIRO)  
九州工業大学・工学研究院・准教授  
研究者番号: 40203947