

# 段差適応型ホロミック全方向移動ロボットの開発

## 第10報：複数の車輪情報を用いたスリップ低減化制御

### Development of Omni-Directional Mobile Robot with Step-Climbing Ability

#### 10<sup>th</sup> Report: Plural Wheels Control based on Slip Estimation

○ 正 中後大輔 (電通大) 正 川端邦明 (理研) 正 嘉悦早人 (理研)  
正 浅間 一 (東大) 三島健稔 (埼玉大)

Daisuke CHUGO, The Univ. of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo  
Kuniaki KAWABATA, RIKEN, Hayato KAETSU, RIKEN,  
Hajime ASAMA, The Univ. of Tokyo, Taketoshi MISHIMA, SAITAMA Univ.

In our current research, we are developing a holonomic mobile system which is capable of running over the step. This system realizes omni-directional motion on flat floor using special wheels and passes over non-flat ground in forward or backward direction using the passive suspension mechanism. In order to realize the high mobile performance during step climbing, it is required to reduce wheel slippage for maximizing wheel traction. This paper proposes a new plural wheel control method based on wheel slip estimation. Our key idea is estimation of wheel slippage comparing with the loads and rotation velocities of all actuated wheels, and using this result for wheel control of the vehicle for reducing wheel slippage. We verify the performance of our proposed control scheme by the experiments using our prototype.

**Key Words:** Omni-Directional Mobile System, Holonomic Function, Step-Climbing, and Wheel Control

## 1. 緒言

原子力施設をはじめ化学プラント等の大規模施設は、安全上の理由等から人間が直接アクセスできない環境が存在する。通常、これらの施設内は配管設備等で狭く入り組んでおり、各所に単純段差が存在する。このような環境を安定して効率的に移動するためには、任意の方向に移動可能な全方向移動機能と共に段差乗り越え機能も必要である。そこで本研究は、このような環境を安定して効率的に移動する、全方向移動能力と段差乗り越え能力を併せ持つ自律型移動ロボットの開発を目的としている。

本研究は、全方向移動機能と段差乗り越え機能を併せ持つ、フリーローラ付き特殊車輪 (Fig.1) を用いたホロミック全方向移動機構にバッシブリンク機構を組み合わせた移動機構 (Fig.2) を開発した。[1] 開発した移動機構は、段差乗り越え能力を高めるため、全車輪に駆動用アクチュエータを備え、各々制御可能である。前報では、車体の変形情報を用いて幾何学的に、各車輪の最適な速度指令値を導出する手法を提案した。しかし、単純に導出した速度指令値を車輪制御に適用すると、段差乗り越え時に車輪のスリップが発生し、段差乗り越え能力が低下する。

従来、種々の車輪スリップ低減化手法が提案されているが、それらは、移動機構の正確な移動速度を得るために外界センサを

必要としたり[2]、車輪・地面間の物理特性パラメータを必要とする[3]ため、実用的ではない。さらに、一般的に不整地走行を前提とした車輪式移動機構は複数の駆動車輪を備えることが多いが、これらの研究は単独の車輪について議論している。

そこで、本稿では車輪のスリップを低減し、段差乗り越え性能を向上させることを目的とし、複数の駆動車輪の回転速度および負荷を計測・比較することで、車輪のスリップ状態を予測する手法を提案する。また、その結果を用いて車輪のスリップを低減する車輪制御システムを開発し、試作機を用いた走行実験でその妥当性を検証した。

## 2. 提案制御手法

本研究で開発している移動機構はアクチュエータが冗長であり、各車輪を各々制御することができる。そこで本研究は、一般的にスリップは全車輪で同時に発生するのではなく、負荷の集中した車輪に発生する点に着目し、複数の車輪の回転速度および負荷を計測・比較することで、車輪のスリップ推定手法を考案した。

提案手法は、スリップ検出条件として以下の条件を設定する。

### 条件 1:

車輪がスリップする場合、他の車輪と比較して制御速度指令値に対する回転速度の差((1)式)が大きいと考えられる。そこで、各車輪の回転速度差を比較し、(2)式に示すとおり、平均値より大きい場合、車輪がスリップしていると推定する。

$$e_i = v_i^{ref} - v_i \quad (1)$$

$$e_i > \left( \sum_{j=1}^7 e_j - e_i \right) / 6 \quad (2)$$

ただし  $v_i^{ref}$  は速度制御指令値、 $v_i$  は実際のアクチュエータの回転速度、 $i$  は車輪番号 ( $i=1, \dots, 7$ ) を示す。

### 条件 2:

上記条件のみでは、一部車輪が過負荷でスタックしている場合、

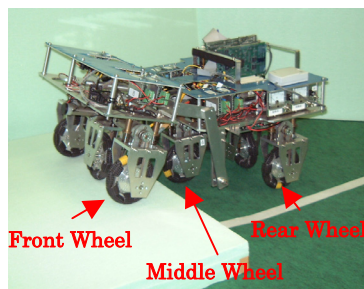
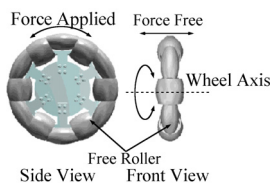


Fig.1 Special Wheel

Fig.2 Prototype Mobile System

通常に回転している車輪がスリップであると誤判定される可能性がある。一般的に、スリップしている車輪は駆動力を接地面に伝達できない状態にあるため、車輪の負荷は軽くなる。そこで条件 2 は、条件 1 でスリップ状態と判定された各車輪の負荷  $\tau_i$  を比較し、(3)式に示すとおり、負荷が平均値より小さい場合、車輪がスリップしていると推定する。

$$\tau_i < \left( \sum_{j=1}^7 \tau_j - \tau_i \right) / 6 \quad (3)$$

条件 1 および 2 より、車輪のスリップが予測できる場合、車輪のスリップを低減するため、速度指令値を調整する。しかし、速度指令値は移動機構の目標速度に従って幾何学的に決定されるため、各車輪の速度比を保つ必要がある。[4] そこで、本研究は(4)式および(5)式に示すとおり、最も大きな負荷がかかっている車輪の出力を低減するとともに、この車輪を基準として他の車輪の出力指令値も調整することとした。

$$c_i = \begin{cases} 6\tau_i / \sum_{j=1}^7 \tau_j - \tau_i & \text{if wheel } i \text{ slips.} \\ 1 & \text{if wheel } i \text{ doesn't slip.} \end{cases} \quad (4)$$

$$\tau_i^{out} = c \cdot \tau_i \quad (5)$$

ただし  $\tau_i^{out}$  はアクチュエータの出力値、 $c = \min\{c_1, \dots, c_7\}$

### 3. 評価実験

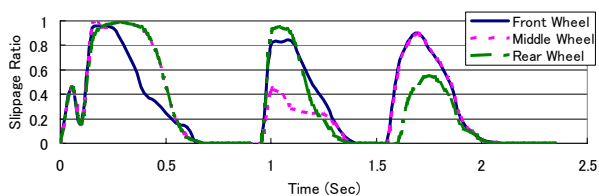
提案手法の有効性を確認するため、実機実験を行った。実験は試作機を高さ 125[mm]の段差に正対させ、速度 0.25(m/sec)で段差を乗り越えるときの各車輪のスリップ率  $\hat{S}_{[2]}$  を求めた。

$$\hat{S}_i = \frac{r_i \omega_i - v_i}{r_i \omega_i} \quad (6)$$

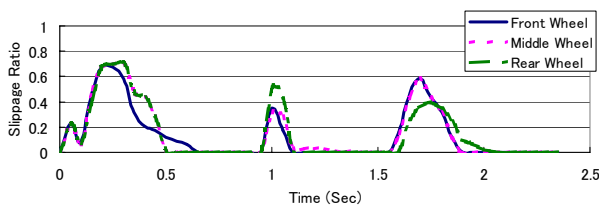
ただし、 $\omega_i$  は各アクチュエータの回転速度、 $\omega_i^{ref}$  は回転速度指令値、 $r_i$  は車輪半径、 $v_i$  は車体の移動速度である。

なお比較のため、提案手法を用いた場合と提案手法を用いない場合(他の条件は同一)で実験を行った。

実験の結果、各車輪のスリップ率を Fig.3 に示す。提案手法を用いなかった場合は(Fig.3(a))スリップが大きく、特に前輪、中輪、後輪が段差と接触した時と考えられる3つのピーク時には100[%]近くまでスリップ率が上昇した。一方、提案手法を用いた場合(Fig.3(b))では、スリップ率はピーク時でも68[%]まで低減するとともに、全体では37[%]に低減した。



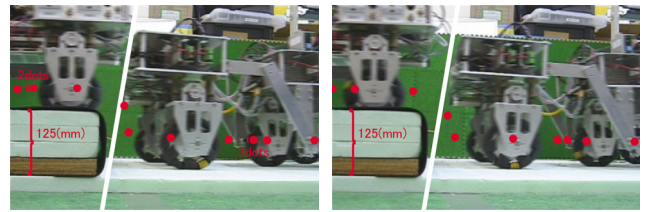
(a) With standard controller



(b) With proposed controller

Fig.3 Slip ratio during passing over 125[mm] height step

また、実験時の試作機の走行状態を Fig.4 に示す。提案手法を用いることで車輪のスリップが低減し、車体がより滑らかに段差を乗り越えていることがわかる。

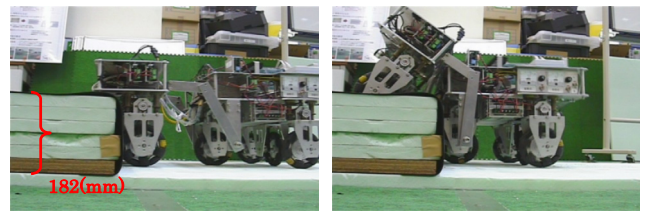


(a) With standard scheme (b) With proposed scheme

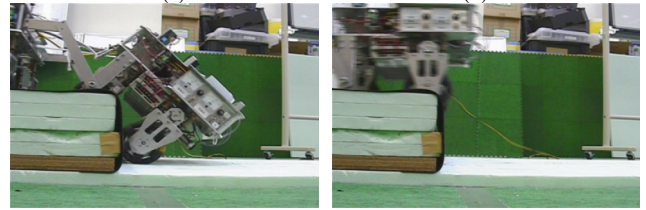
Fig.4 Tracks during passing over 125[mm] height step  
Red points are plotted at every 0.3[sec].

さらに、試作機が乗り越えることができる最大の段差の高さを確認したところ、提案手法を用いなかった場合の段差乗り越え可能高さは132[mm]の車輪径に対し125[mm]であったのに対し、提案手法を用いた場合は182[mm]の段差まで乗り越え可能であった。

以上の結果より、提案手法を用いることで車輪のスリップが低減し、段差乗り越え能力が向上することが確認できた。



(a) (b)



(c) (d)

Fig.5 Passing over 182[mm] height step

### 4. 結論

本稿では、車輪のスリップを低減し、段差乗り越え性能を向上させることを目的とし、複数の駆動車輪の回転速度および負荷を計測・比較することで、車輪のスリップ状態を予測する手法を提案した。また、その予測結果を用いた車輪のスリップを低減する車輪制御システムを開発し、試作機に実装した。実機実験により、段差乗り越え走行時における車輪のスリップの減少および段差乗り越え能力の向上を確認し、提案手法の有効性を実証した。

### 参考文献

- [1] D. Chugo, *et al.* "Development of omni-directional vehicle with step-climbing ability," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3849-3854, 2003
- [2] K. Yoshida, H. Hamano and T. Watanabe, "Slip-based Traction Control of a Planetary Rover," Advanced Robotics, Vol.5, pp. 644-653, 2003.
- [3] C. W. Carlos, M.L. Petersen and A.S. Shiriaev, "A new observer for tire/road distributed contact friction," Proc. of IEEE Conf. on Decision and Control, pp.2246-2251, Hawaii, December 2003.
- [4] D. Chugo, *et al.*, "Vehicle Control Based on Body Configuration," Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1493-1498, 2004.