

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題	ローラーウォーカーに関する研究 第10報：能動足首ヨー自由度制御による全方向移動
Title	Study on Roller-Walker No.10 Omni-Directional Locomotion using Ankle Yaw Degree of Freedom Control
著者	遠藤玄, 小松洋音, 広瀬茂男
Author	Gen Endo, Hirone Komatsu, SHIGEO HIROSE
掲載誌/書名	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, , 2P1-D13
Journal/Book name	Proceedings of the 2009 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, , 2P1-D13
発行日 / Issue date	2009, 5
URL	<a href="http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html">http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html</a>
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本機械学会に帰属します。
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

# ローラーウォーカーに関する研究

## 第 10 報：能動足首ヨー自由度制御による全方向移動

### Study on Roller-Walker

Omni-Directional Locomotion using Ankle Yaw Degree of Freedom Control

遠藤 玄（東工大院） 学 小松 洋音（東工大院） 正 広瀬 茂男（東工大院）

Gen ENDO, Tokyo Tech., gendo@mes.titech.ac.jp

Hirone KOMATSU, Tokyo Tech., komatsu@mes.titech.ac.jp

Sigeo HIROSE, Tokyo Tech., hirose@mes.titech.ac.jp

Roller-Walker is a leg-wheel hybrid mobile robot using a passive wheel equipped on the tips of each leg. The passive wheel can be transformed into sole mode by rotating ankle roll joint when Roller-Walker walks on a rough terrain. This paper describes omni-directional skating motion with ankle yaw rotation mechanism which permits the robot to independently determine the tangential direction of the passive wheel regardless of the position of the leg. We propose a new algorithm which achieves desired velocity in arbitrary direction and the method was evaluated by both numerical simulation and hardware experiments.

**Key words:** Leg-wheel hybrid robot, Roller-Walker, Omni-directional motion

## 1 はじめに

ローラーウォーカーとは歩行機械の脚先に駆動力を持たない受動車輪を取り付け、歩行のための脚の自由度をそのまま用いてローラースケートと同様の原理で効率よく推進する脚-車輪型ハイブリッド移動体である (Fig. 1)。足首ロール角度を直角に変化させることで平坦地では車輪による推進、不整地では足の裏として用いて歩行を行うことで、歩行機械の特質を損なうことなく車輪移動機能を実現できる。特に受動車輪を用いた推進をローラーウォークと呼び、現在までに 4 脚すべてを支持脚とし、左右脚を正弦波を用いて対称的に駆動するという簡単な前提条件の下、直進・旋回などの基本的運動生成法 [1]、走行路面に応じた適応的運動生成法が提案検証されてきた [2]。

本論文ではより高い運動性能を実現するため、受動車輪の転がり方向を脚位置と独立に設定することを可能にする足首ヨー自由度を導入することを提案する。そして任意の方向の目標速度ベクトルを実現するための脚運動制御法を提案し、直進・斜行・横行・姿勢を変えない円運動を計算機シミュレーション・実機実験により検証した。

## 2 足首ヨー自由度

人間のローラースケートを考えると、脚を上げずに蛇行推進する Swizzle movement は後退動作などの特殊な場合のみで、ほとんどの推進運動は遊脚動作を伴う。遊脚動作が可能であれば Fig. 2 に示すような段差踏破が可能になるだけでなく、歩容と受動車輪推進を混合したより柔軟で多様かつ高い運動性能を発揮できる可能性がある。

しかしながら、従来のローラーウォーカーの脚機構では脚位置を定めると必然的に受動車輪の転がり方向も一意に定まってしまう、その結果、重心位置を考慮して遊脚化することと、受動車輪推進を両立することが極めて困難であった。もし車輪の転がり方向を独立に制御することが可能であれば、遊脚化が実現できると考えられる。

また車輪の転がり方向を足首のみで変更できれば、従来必要であった脚の踏み変え動作などを経ることなく超信地旋回・横行などの動作を実現することが可能であり、(非ホロノミック系ではあるものの) 全方向移動も可能であると考えられる。

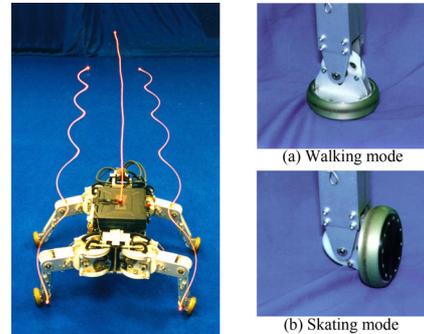


Fig. 1 Roller-Walker: the white lines show trajectories of the frontal leg ends and the body.(left)

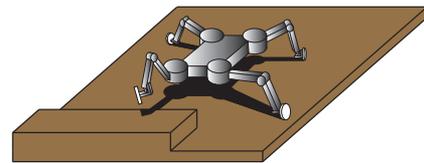


Fig. 2 Stepping over Roller-Walk with a swing leg

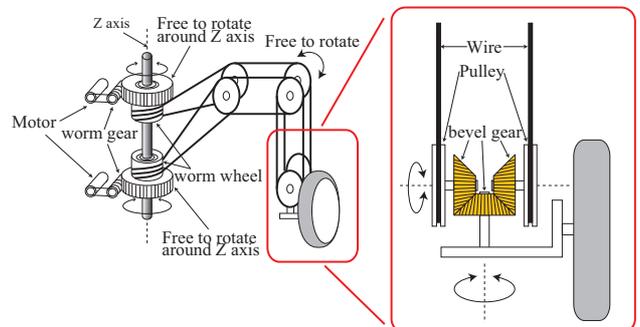


Fig. 3 2DOF ankle mechanism with coupled differential actuation

ところでローラーウォーカーの利点は単純な足首切替機構による質量増加の最小化であった。したがって単純にアクチュエータを脚先に取り付ける設計ではそもそもの特質を失いかねない。

Fig. 3に足首ヨー自由度機構例を示す．現在導入されているワイヤ・プーリ系による平行リンク機構と足首ロール軸駆動機構と並列に，同様の機構を配し足首で傘歯車による2自由度差動機構を構成している．足首ヨー軸は車輪接地点に対しオフセットがあることから，ヨー軸駆動トルクは受動車輪の転がり抵抗のみとなり，足首ロール軸駆動と同様，軽量小型のアクチュエータで十分である．また干渉駆動の効果で現在装備しているロール軸アクチュエータよりさらに小型化することも可能であろう．

### 3 足首ヨー自由度を用いた脚軌道生成

本節では新たに追加された足首ヨー自由度を用いて，目標速度ベクトル  $V_d$  を生成する脚先位置軌道および足首ヨー角度  $\alpha_i(t)$  を導出する方法を提案する．Fig. 4に胴体座標系を示す．添え字  $i$  は図示する脚番号を表す．

今， $V_d$  が与えられ，脚運動により受動車輪が  $V_1$  で駆動されているとき，車輪に軸方向の滑りが生じないためには転がり方向，すなわち足首ヨー角度  $\alpha_1(t)$  を  $V_1$  と  $V_d$  の合成速度ベクトル  $V_{s1}$  の方向と一致させる必要があり，一意に定めることが出来る．

ところで  $V_1$  は任意性があり脚の出力・可動範囲内で無限の可能性がある．本論文では姿勢を保ったまま直進・横行・円運動を実現することを目標とし，脚配置の対象性を考慮して放射状に4脚を広げた脚配置とし，脚長  $d(t)$  のみ正弦波で4脚同位相で駆動されるものと設定した．

$$d(t) = d_{offset} + d_0 \sin(\omega t + 3\pi/2) \quad (1)$$

ここで  $d_{offset}$ ,  $d_0$ ,  $\omega$  は各々脚長の初期長さ，伸縮動作の振幅，角速度である． $|V_i(t)|$  は式(1)を時間微分することにより得られる．

$$|V_i(t)| = d_0 \omega \cos(\omega t + 3\pi/2) \quad (2)$$

$V_d$  と  $V_i(t)$  から余弦定理を用いると次式が得られる．

$$|V_{si}(t)|^2 = |V_d|^2 + |V_i(t)|^2 - 2|V_d||V_i(t)| \cos(\theta_v + \phi_i) \quad (3)$$

ここで  $\theta_v$  はY軸(本体前方向)と  $V_d$  のなす角， $\phi_i$  は脚位置の初期オフセットであり， $(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) = (3\pi/4, -3\pi/4, \pi/4, -\pi/4)$  とする．さらに  $|V_i|$ ,  $|V_d|$ ,  $|V_{si}|$  から余弦定理を用いて足首ヨー角度  $\alpha_i(t)$  が求められる．

$$\alpha_i(t) = \pm \cos^{-1} \left( \frac{|V_d| - |V_i(t)| \cos(\phi_i + \theta_v)}{|V_{si}(t)|} \right) - (-1)^i \theta_v \quad (4)$$

なお符号は  $V_i$ ,  $V_d$  を考慮して適宜選択する．

ところで，これまでに導かれた足首ヨー角度は受動車輪が軸方向に滑りを生じないための必要条件であり，目標速度が実現できるかどうかは保障されない．実際推進可能か否かは受動車輪の軸方向・転がり方向の摩擦係数比と， $V_d$  と受動車輪転がり方向のなす角度の大きさに大きく依存す

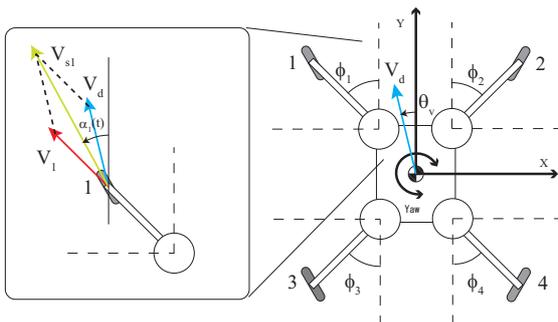


Fig. 4 Kinematics model for analysis

る．しかしながら文献[2]によれば  $V_d$  と受動車輪転がり方向のなす角度を十分に大きく取れば(たとえば  $20[\text{deg}]$  以上)  $V_d$  を達成できることが実験的に分かっている．したがって運動生成の際には  $d_0, \omega$  を適宜調整し，十分大きな  $\alpha_i(t)$  となるよう選択する．

### 4 実験

計算機シミュレーションにより提案手法の実現可能性を検討した．正弦波脚軌道を  $d_0 = 0.08[\text{m}]$ ,  $\omega = 3.14[\text{rad/s}]$  とし， $|V_d| = 0.3[\text{m/s}]$ ,  $\theta_v = 60[\text{deg}]$  とした場合の推進速度変化を Fig. 5(a) に示す．本体の Yaw 回転をほとんど生ずることなく，ほぼ目標通りの並進速度を実現している．次に  $|V_d| = 0.3[\text{m/s}]$  とし方向を  $10[\text{deg/s}]$  の速さで一定に変化させた場合の移動軌跡を Fig. 5(b) に示す．このとき本体 Yaw 姿勢は  $\pm 3[\text{deg}]$  のほぼ一定値を保持しながら本体中心位置は円弧軌道を生成した．

さらに，TITAN VIII の脚先に簡易実験用の足首 Yaw 駆動機構を装備することで，提案手法の有効性を実機検証した． $|V_d| = 0.3[\text{m/s}]$  とし  $\theta_v = 0, 45, 90[\text{deg}]$  と設定し直進実験を行った．このときいずれの場合も推進開始時に進行方向に乱れを生じたが，その後は姿勢を大きく変えることなく目標進行方向に進むことを確認した．Fig. 6に直進走行時の速度変化をシミュレーション結果と合わせて示す．実機速度は測定車輪のデッドレコニングにより計測した．定常状態の平均速度はシミュレーション・実機各々  $0.27[\text{m/s}]$ ,  $0.33[\text{m/s}]$  と比較的良好な一致が見られる．

最後にシミュレーションと同様に円弧軌道に沿うよう  $V_d$  を変化させると姿勢を変えずに進行方向が変わっていく様子が定性的に確かめられた(詳細は添付ムービー参照)．

### 5 まとめ

本論文では能動足首を利用したローラーウォークによる移動法を提案した．今後は姿勢の制御も含む全方向移動を実現するとともに，実機開発，遊脚動作を含む推進方法を検討してゆく．

### 参考文献

- [1] 遠藤 玄, 広瀬 茂男:“ローラーウォーカーに関する研究-基本的運動の生成と自立推進実験-”, 日本ロボット学会誌, 18, 7, pp.1159-1165, 2000.
- [2] 遠藤 玄, 広瀬 茂男:“ローラーウォーカーに関する研究-脚軌道による推進特性の適応的調節-”, 日本ロボット学会誌, 26, 6, pp.691-698, 2008.

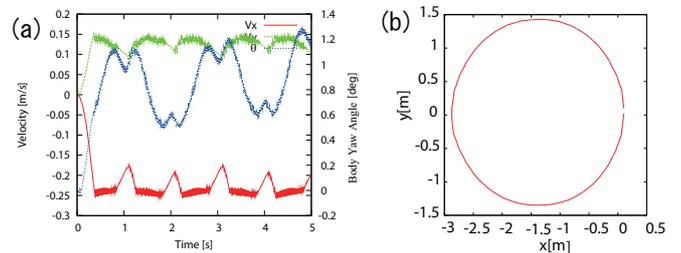


Fig. 5 Velocity simulation

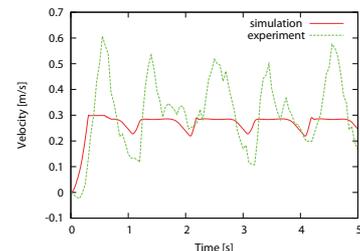


Fig. 6 Experimental result