T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

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11報：ローラーウォークによる氷上滑走実験
Title	Study on Roller-Walker No.11: Roller-Walk Experiments on Ice
著者	遠藤玄, 広瀬茂男
Author	Gen Endo, 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 2010 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, , , 2P1-D13
発行日 / Issue date	2010, 6
URL	http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html
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。

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

ローラーウォーカーに関する研究

第 11 報：ローラーウォークによる氷上滑走実験

Study on Roller-Walker

No.11: Roller-Walk Experiments on Ice

○　遠藤 玄（東工大院）　　正　広瀬 茂男（東工大院）

Gen ENDO, Tokyo Tech., gendo@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 tip of each leg. The passive wheel can be transformed into a sole mode by rotating the ankle roll joint when Roller-Walker walks on rough terrain. This paper reports propulsion experiments on ice using a specially manufactured skate edge. We verified that Roller-Walker could propel on ice at 0.5 m/s.

Key words: Leg-wheel hybrid robot, Roller-Walker, ice skating

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 (図 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 [2]，移動のエネルギ効率 [3] などが検証されてきた．

ローラーウォークによる推進は受動車輪の摩擦係数に異方性があることを利用するものであり，その基本的な原理は氷上を滑走するアイススケートと同様である．したがって受動車輪で地上を走行可能な脚軌道をそのまま用いて氷上滑走も可能であると考えられる．氷とスケートとの動摩擦係数は 0.005 程度と言われており [4]，受動車輪よりさらに一桁小さな値となることから，ローラーウォーク推進の特色を活かすことの出来る理想的な環境であると思われる．

筆者らの知る限り氷上滑走をロボットで実現したのは，筆者らによる索状能動体 ACM-R1 を用いた推進 [5] だけであり，未だ詳しくは検討されていない．もし氷上を高速に滑走する移動体が実現できれば，極地探査を行う移動機械や，アイスショーなどのエンターテインメント分野での応用も考えられる．氷上高速滑走を実現する第一歩として，本論文では脚先に円板状のスケートエッジを装備することで氷上推進を実現したのでこれを報告する．

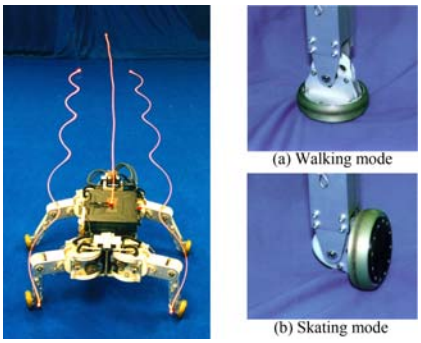

Fig. 1　Roller-Walker: the white lines show trajectories of the frontal leg ends and the body.(left)

2　運動学モデル

脚は遊脚化せず左右対称の周期運動をするものとする (図 2)．脚機構の質量を無視しロボットの全質量を質点として本体中心に仮定する．車軸は脚に直角に固定され Yaw 方向の自由度は持たず，キャンバー角は常に 90 度であるとする．脚先の受動車輪位置を転がり方向（接線方向）と軸方向（法線方向）に各々正弦波で駆動する．（実機モデルの初期姿勢と可動範囲を考慮して適宜オフセットを加えている．）

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

$$\theta(t) = -\theta_0 \sin(\omega t + 3\pi/2 + \phi) \tag{2}$$

このとき制御パラメータは $d_0, \theta_0, \omega, \phi$ の 4 つである．胴体座標系における脚軌道の一例を図 2 に示す．一つの受動車輪に働く接線力，法線力の大きさはそれぞれ $F_t(t), F_n(t)$ として次式で表される．

$$F_t(t) = -sgn\big(V\cos\theta(t) + d(t)\dot{\theta}(t)\big)\cdot\mu_t\cdot W/4 \tag{3}$$

$$F_n(t) = -sgn\big(V\sin\theta(t) + \dot{d}(t)\big)\cdot\mu_n\cdot W/4 \tag{4}$$

ここで $sgn(*)$：符号関数，V：推進速度，μ_t, μ_n：接線・法線方向クーロン摩擦係数，W：ロボット重量である．後脚についても同様にモデル化を行い，推進速度の加減速を最小化するため前後の周期関数に対して位相差 $\phi_{fr} = 3\pi/2$[rad] を導入する [1]．脚は左右対称に駆動されることから図中左右方向の力はキャンセルされ，上下方向の力のみがロボット本体に作用することになる．この推進力が本体質量を加速するものとして加速度を算出し，数値積分することで推進速度 V を求めることが出来る．シミュレーションの時間刻みは 10[ms] とした．

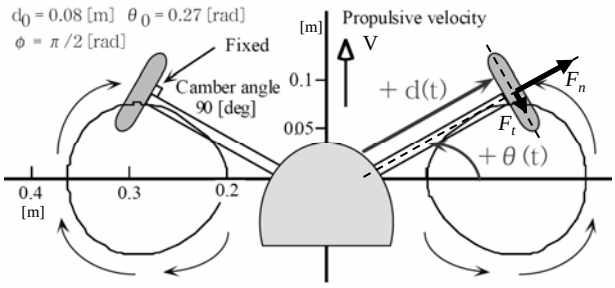

Fig. 2　Simulation model

3　スケートエッジ

人間のスケート靴のエッジ長さはスピードスケートを除けば一般に 0.3[m] 前後で，体重 60[kg] の人が片脚を常に遊脚化していると考えればエッジ長さ当たりの圧力は 200[kgf/m] である．一方でローラーウォーカーの足底は 0.084[m] で，質量が 27[kg] であるとすると四脚とも常に支持脚であればその圧力はおよそ 80[kgf/m] となり，接地圧は人間の場合の 4 割程度である．従って，エッジ長さを短くし接地面積を減らすことが重要であると思われる．

そこで受動車輪の側面に取り付ける SUS303 製の鋭い円板上のエッジを設計した（図 3）．円板形状のエッジであることから氷上との接地線は短くなり，接地圧が上昇するとともに，車軸周りの回転自由度も有したままであるので，接線方向に滑りが少ない場合でも少なくとも車輪の転がり摩擦係数以下になるものと期待される．

4　実験

製作したエッジを装備し氷上滑走実験を行った．脚軌道パラメータを $d_0 = 0.05[m], \theta_0 = 0.45[rad], \phi = \pi/2[rad]$ として ω をゼロから徐々に大きくすることで推進を試みた．ところが接地圧が予想に反して高過ぎたためエッジが深く氷に食い込み，法線方向に全く滑らず脚機構に過大な負荷が生じていることが観察されたため，実験を中止した．式 (1)(2) で表わされる脚軌道は推進速度が一定である場合には法線方向にほとんど滑りを生じないが，加速の段階では滑りが生じるため [3]，これによる問題と思われる．

そこで法線方向への滑りを許容するため歯先を削り，およそ 0.8[mm] の厚みを持たせた（図 4）．ロボットに装備した状態でバネばかりを用いて測定した動摩擦係数はそれぞれ $\mu_n = 0.28, \mu_t = 0.07$ であった．

このエッジを用いて再度実験を行った．ω をゼロから徐々に大きくするとローラーウォーカーは推進を開始し，氷上を滑走することが出来た．また地上と同様にマニュアル操縦により目標ポール間をスラローム走行させることも可能であった．また $\theta_0 = 0.16, 0.3, 0.45[rad]$ として $\omega = 0$〜$5.2[rad/s]$ の範囲で変化させたときの運動の様子を動画で撮影し，推進速度を求めると最大で $0.53[m/s]$ であった．実験の結果，氷上推進が可能であることは確かめられたが，人間のスケートのような高速推進は実現できなかった．

5　考察

最大推進速度は法線／接線方向摩擦係数比に大きく依存する [2]．測定された $\mu_n/\mu_t = 4.0$ を用いて θ_0 をパラメータとして推進速度 V のシミュレーションを行った．実測値と合わせて結果を図 6 に示す．シミュレーションの結果でも最大速度は 0.61[m/s] に留まっていることが分かる．受動車輪の摩擦係数比はビニル床上で 15 程度であることを考えると，本報告での摩擦係数比はかなり小さいことが分かる．これはエッジが氷に沈み込みスケートが滑るよりもむしろ乗り上げるための転がり抵抗を生じていることによるものと思われる．エッジ形状の改善が必要であることが強く示唆され，今後改善を進めてゆく．

6　謝辞

快く実験の場を提供してくださいました神奈川スケートリンクの皆さまに深く感謝いたします．また実験実施にご協力いただいた東工大高山俊男先生に感謝申し上げます．

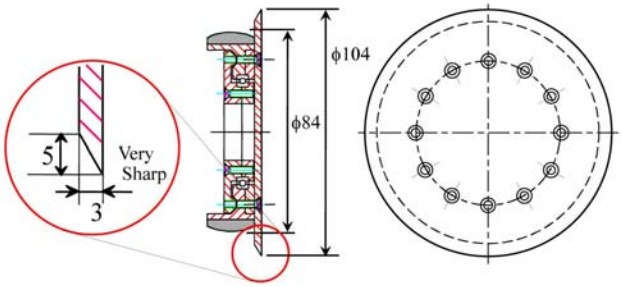

Fig. 3　Discoid edge attached to the passive wheel

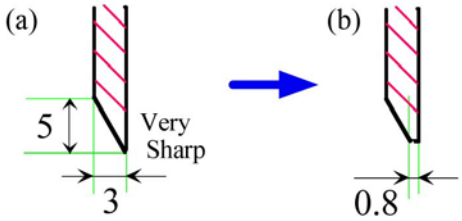

Fig. 4　Grounded edge allowing the slippage in the normal direction

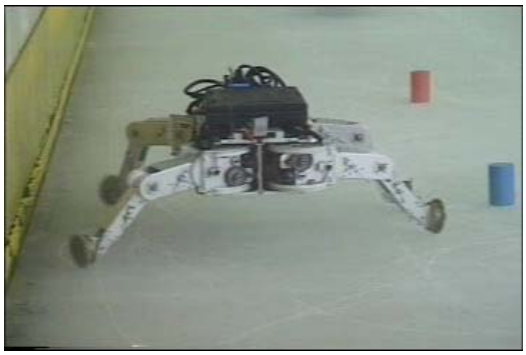

Fig. 5　Maneuvering experiment in a slalom course

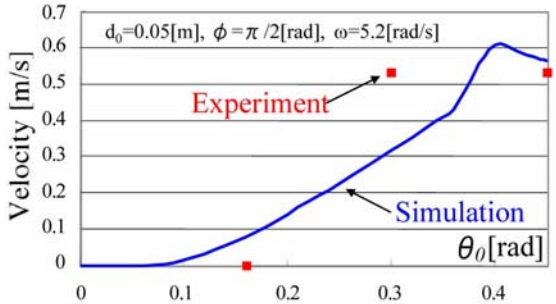

Fig. 6　Resultant velocity V in relation to θ_0

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.

[3] 遠藤 玄, 広瀬茂男:“ローラーウォーカーに関する研究 第 9 報：ローラーウォーク推進の移動効率”, ロボティクス・メカトロニクス講演会’09, 2P1-D12, 2009.

[4] 対馬勝利:“配向性氷による高速スケートリンク作成”, 表面科学 Vol. 27, No. 1, pp. 54-57, 2006.

[5] 遠藤 玄, 外川圭司, 広瀬茂男:“索状能動体に関する研究-システムの自立化と対地適応推進-”, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 3, pp. 419-425, 2000.