

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	人力ロボティクスに基づく足こぎ式自律搬送ロボットシステム (第5報 : 全方向移動型人力モビリティ)
Title(English)	Autonomous Pedaled Transporter System based on Man-powered Robotics -5th Report: Omnidirectional Man-powered Mobility-
著者(和文)	遠藤央, 菅原雄介, 柿崎隆夫
Authors(English)	Mitsuru Endo, Yusuke Sugahara, Takao Kakizaki
出典(和文)	第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, , , pp. 998-1001
Citation(English)	, , , pp. 998-1001
発行日 / Pub. date	2018, 12
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は公益社団法人計測自動制御学会に帰属します。 (c) 2018 The Society of Instrument and Control Engineers

# 人力ロボティクスに基づく足こぎ式自律搬送ロボットシステム 第5報：全方向移動型人力モビリティ

○遠藤 央（日本大学），菅原 雄介（東京工業大学），柿崎 隆夫（日本大学）

## Autonomous Pedaled Transporter System based on Man-powered Robotics - 5th Report: Omnidirectional Man-powered Mobility -

○Mitsuru ENDO (Nihon Univ.), Yusuke SUGAHARA (Tokyo Inst. of Tech.) , and Takao KAKIZAKI (Nihon Univ.)

Abstract : In this study, focusing on transportation of a heavy small object, a transportation system utilizing a robotic mobility based on Man-powered Robotics, is proposed. The robot system consists with multiple driving units, which are driven by human pedaling torque, and transports an object autonomously and intelligently. In this paper, a mechanism, which realizes omnidirectional mobility and consists with multiple Man-powered transmission, is described, and periments are valid the system.

### 1. はじめに

平成 22 年から平成 27 年における厚生労働省の調査では、原動機を搭載した運搬機械（動力運搬機械）は年間約 3,619 件、人の力で動作する運搬機械（人力運搬機械）は年間約 3,664 件の事故が報告されている [1]. 安全性の向上のため、動力運搬機械では倉庫全体を完全無人化する試み [2][3]etc. や、知能化された動力運搬機械に安全制御を実装する試み [4][5]etc. など多くが取り組まれてきた。これらは動力運搬機械のコンピュータにより知的動作を生成するものである。

一方で、台車やハンドリフトに代表される人力運搬機械は全て動力運搬機械には置換できない手軽さや取り回しのよさなどのメリットが多数あるが、その性質より事故の減少に貢献する技術の開発や研究例は数少ない。具体的には、人の動力で動くため機械と人の作業空間の分離が不可能である。また、人の動力が前提であるためアクチュエータを構成要素として搭載できない。そのため、従来の安全制御技術の適用も困難であり、安全性向上に係る対策は使用方法の確認や使用時の声掛け程度に留まっているのが現状である。

そこで本研究では人力運搬機械を知能化し、小型重量物搬送の安全性向上を目的とする。アクチュエータを搭載できないため、人力を動力源とし知的動作を実現する人力ロボティクス [6] を用いる。同様に人力を動力源として物体を搬送するシステムで知的動作を実現するパッシブロボティクス [7] と異なり、完全自律型の搬送システムが構築可能である。本研究ではこれまでに、この人力ロボティクスを応用した足漕ぎ式自律搬送ロボットのコンセプトを提案し [8], 移動モジュールの設計について提案した [9]. ま

たシミュレーションにより、人力駆動型モビリティの運動制御の特性を確認した [10]. 本項では運動制御手法について述べ、実験によりその有効性を示す。

### 2. 足漕ぎ式自律搬送ロボット

本システムは、人力運搬機械を知能化することでシステムにより積極的に操作支援し、ヒューマンエラー起因の事故を無くすことを目指す。提案するシステムは一般的な人力運搬機械を利用する場所での利用を想定する。ロボットは環境を外界センサにより計測し、環境を認識する。環境中の障害物などの情報に基づき、経路生成する。また、動的物体の回避動作を運動に重畳しながら目的地までの搬送を実現する [11]. これにより能動安全を得られる。加えて、本システムでは人の動力供給が停止したときシステムが停

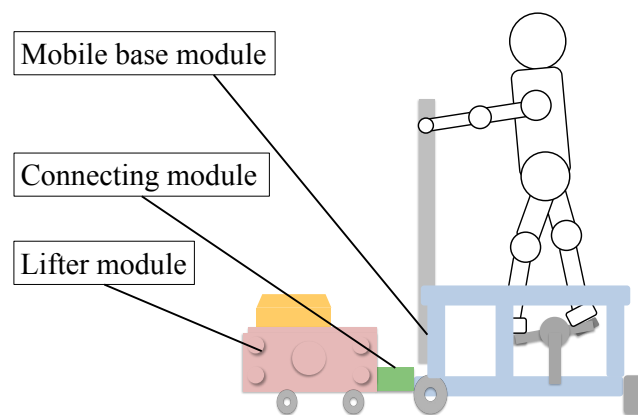


Fig. 1: Composition of a proposed system

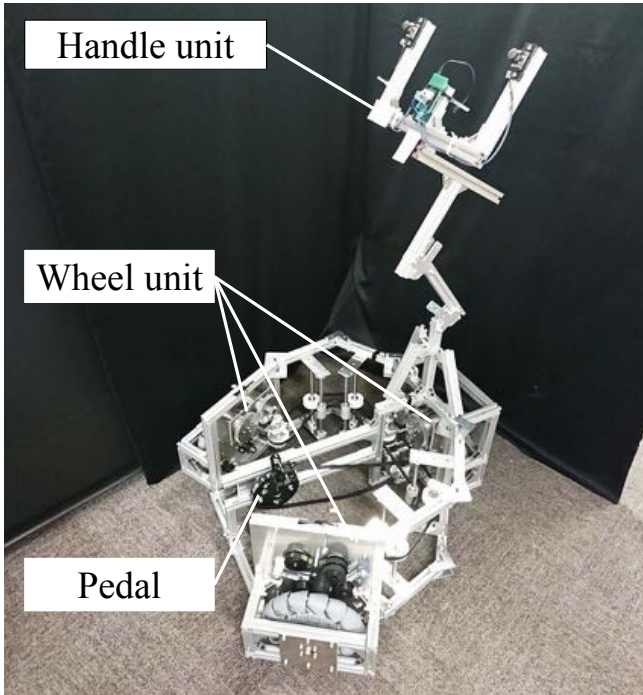


Fig. 2: Mobile base module

止する。いわばデッドマンスイッチを備えると言える。これにより受動安全化が実現でき、より高い安全を得られる。

Fig.1 に本研究で提案する搬送ロボットの概念図を示す。移動モジュールは搬送ロボットの移動を担い、狭所での搬送にも対応するために全方向移動機構とする。把持モジュールは重量物を把持し持ち上げる機構とする。連結モジュールは2つのモジュールをつなぐ役割を担い、任意の軸方向と軸回りの運動を拘束して地面の凹凸にも対応可能なサスペンション機構とする [12].

### 3. 全方向移動機構を有する移動モジュール

Fig.2 に製作した移動モジュールを示す。移動モジュールは人の操作入力のためのコントローラと3つの車輪ユニット、それら車輪ユニットを固定するフレームとで構成される。Fig.3 に全方向移動機構の3D-CAD 図を示す。ペダルに入力された動力はタイミングベルト・タイミングプーリーを介して各車輪へ伝達される。それぞれの動力は各車輪に搭載された人力伝達機構 [9] に伝達され、車輪軸周りのサーボ制御を実現する [6]。車輪に全方向移動輪を用いることで全方向移動を実現する。

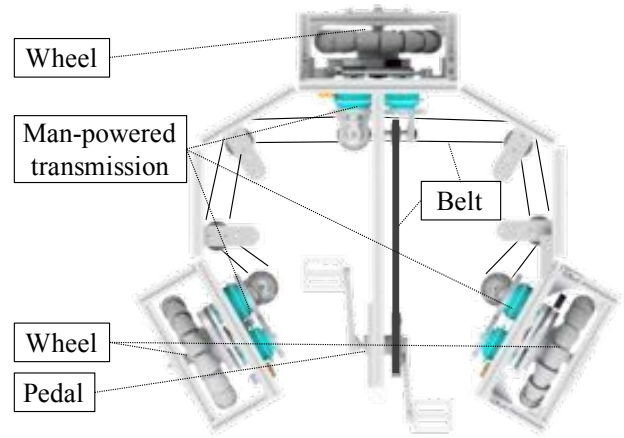


Fig. 3: Mechanism of transmission

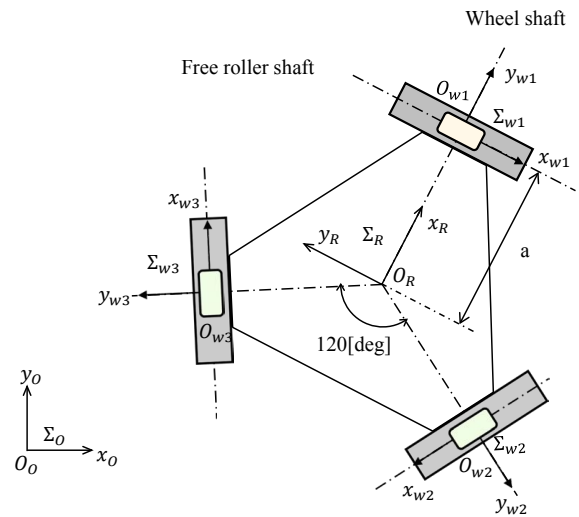


Fig. 4: Wheel arrangement and its coordinate system

### 4. 移動モジュールの走行制御手法

Fig.4 に移動モジュールのモデルと設定した座標系を示す。図中の灰色長方形で示す車輪の車輪軸上にそれぞれ  $i \in \mathbf{Z}$  番目の車輪座標系  $\Sigma_{wi}$  を定義する。また、それぞれの車輪軸は  $120 \text{ deg}$  位相で固定されているとし、車輪軸の交点にロボットの制御点を設定する。制御点上にロボット座標系  $\Sigma_r$  を定義する。ある時間におけるロボットの位置姿勢が、位置と姿勢のコンフィギュレーション空間で  ${}^o\mathbf{P}_{rc}(t) \in \mathbb{R}^3$  で表されるとする。この時、目的地などの境界条件から補間式などを用いて算出される現在の目標位置を  ${}^o\mathbf{P}_{rd}(t) \in \mathbb{R}^3$  とする。

ここで、Fig.5 に示すように目標の位置と実際の位置の間にスプリング・ダンパー系の仮想内部モデルを設定する。この仮想内部モデルではロボットは質点としてモデリング

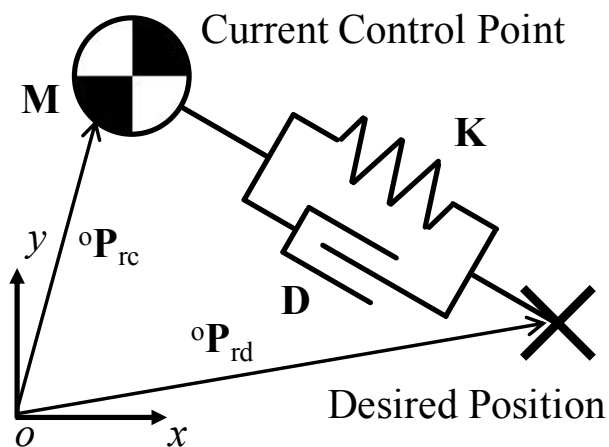


Fig. 5: Wheel arrangement and its coordinate system

する。モデル以外の外力がかからないので仮想内部モデルはラプラス空間で次式のように表される。

$$\mathbf{M}^o\mathbf{A}(s) = (s\mathbf{D} + \mathbf{K})({}^o\mathbf{P}_d(s) - {}^o\mathbf{P}_c(s)) \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  は仮想内部モデルの制御点の慣性行列、 $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  および  $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  はそれぞれ仮想内部モデルの目標の位置と実際の位置間に設定された粘性行列と剛性行列である。また、 ${}^o\mathbf{a} \in \mathbb{R}^3$  は仮想内部モデルにおける制御点の加速度である。

制御点の加速度  ${}^o\mathbf{a}$  を実現するロボットの車輪トルクを算出する。本項では簡単のためにロボットの走行抵抗や摩擦などが無いと仮定することで、ロボットが発生するコンフィギュレーション空間における力  ${}^o\mathbf{F}_{(i)} \in \mathbb{R}^3$  は次式のように決められる。

$${}^o\mathbf{F}(s) = \mathbf{M}_r {}^o\mathbf{A}(s) \quad (2)$$

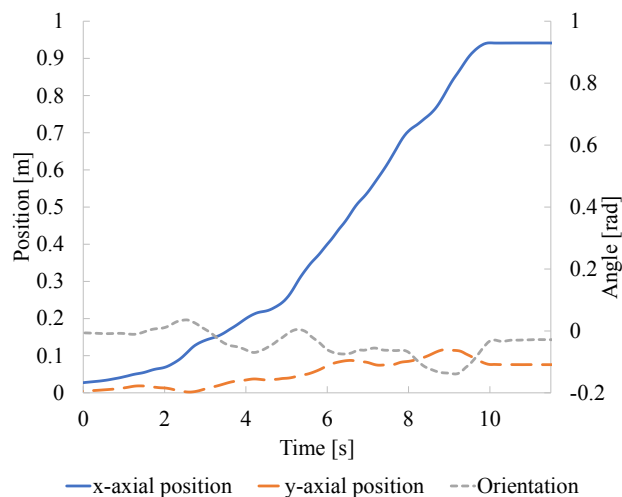
ここに、 $\mathbf{M}_r \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  はロボットの実際の慣性行列である。算出されるロボットのカベクトル  ${}^o\mathbf{F}_{(i)}$  より、ヤコビ行列を用いることで各車輪軸まわりのトルクは次のように算出される。

$$\tau_{(i)} = \mathbf{J}^{-1} {}^o\mathbf{F}_{(i)} \quad (3)$$

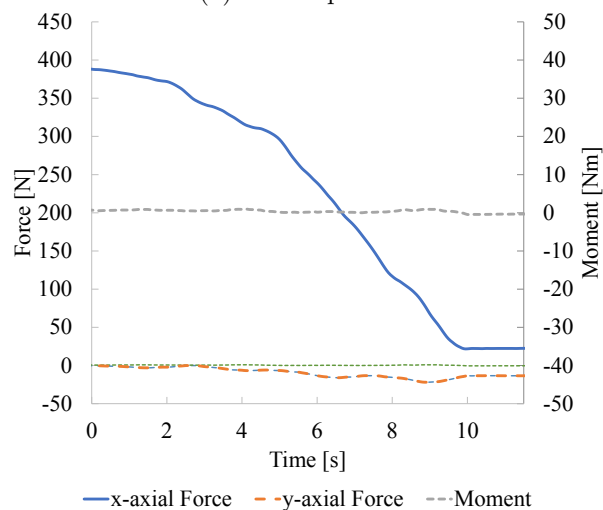
ここに、 $\tau(s) \in \mathbb{R}^3$  は車輪軸のトルクベクトル、 $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  はヤコビ行列である。算出されるトルクベクトル  $\tau(s)$  を各車輪において実現することで、ロボットの運動を生成する。

## 5. 走行実験

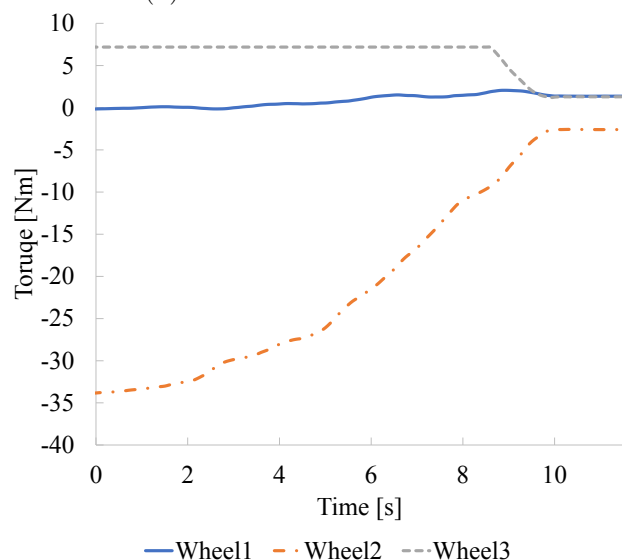
製作した移動モジュールと提案したアルゴリズムによる全方向移動を実験により検証する。実験には Fig.2 に示した移動モジュールに前節で述べたアルゴリズムを実装する。指令は外部端末から入力するとし、搭乗者は任意のペース



(a) Moved position



(b) Desired force and moment



(c) Desired torque around output axes

Fig. 6: Experimental result: translation

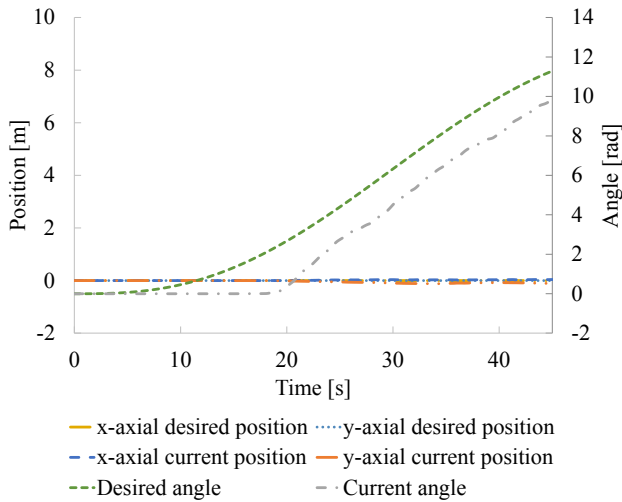


Fig. 7: Experimental result: rotation

でペダリングすることを前提とする。Fig.6 に  $x_R$  方向に操作指令を入力したときの移動モジュールの位置と姿勢の変化を示す。目標は  $x_R$  方向に 1 m とした。図 (a) より目標の位置に移動モジュールを制御可能なことを示した。また (b) および (c) では、仮想内部モデルで生成される目標の仮想力と、それに基づき算出される車輪軸まわりのトルクを示す。司令値に基づき、運動が生成されている。Fig.7 には回転運動の実験結果を示す。回転についても運動が生成され、目標の追従するよう運動していることがわかる。

## 6. おわりに

本研究では人力運搬機械の安全性向上のために、それを知能化する技術として人力ロボティクスを用いることを提案している。具体的には足漕ぎ式自律搬送システムとして応用することで、人力運搬機械が対象とする小型重量物の搬送を従来通り人の力により実現する。この時、人力ロボティクスにより運動は自律的に制御される。本項では製作した移動モジュールについて述べ、それに適用する運動制御アルゴリズムを提案した。また、実験よりその有効性を示した。今後は自律搬送システムを構築するだけでなく、把持モジュールとの統合を目指す。

## 謝辞

本研究の一部は科学研究費助成事業（基盤研究 (C)(一般)）17K06254 の補助により実施した。この場を借りて感謝の意を示す。

## 参考文献

- [1] 厚生労働省, “労働災害統計”, 2016.
- [2] R. D’Andrea, et., al “Future challenges of coordinating hundreds of autonomous vehicles in distribution facilities”, *TePRA2008*, pp.80-83, 2008.
- [3] 堂前, “Amazon Picking Challenge 2016”, 日本ロボット学会学会誌, Vol.34, No.10, p.696, 2016.
- [4] 村井, 他, “自律移動ロボット群による搬送システムの実用化”, 日本ロボット学会学会誌, Vol.28, No.3, pp.311-318, 2010.
- [5] 今井, 他, “病院内ロボット搬送システムの開発”, 日本ロボット学会学会誌, Vol.27, No.10, pp.1101-1104, 2009.
- [6] 菅原, 他, “人力ロボティクスの研究 (第 1 報, 1 自由度関節機構の試作)”, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2013, 2A1-E01, 2013.
- [7] Y. Hirata, et., al, “Coordinated Motion Control of Multiple Passive Object Handling Robots based on Environment Information”, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 2009*, pp.2338-2343, 2009.
- [8] 射手園, 他, “人力ロボティクスを応用した自律搬送システム”, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 2016, 1G2-4, 2016.
- [9] 射手園, 他, “人力ロボティクスを応用した足漕ぎ式自律搬送システム -搬送ロボットの機構設計-”, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2017, 2A2-L03, 2017.
- [10] 射手園, 他, “人力ロボティクスを応用した自律搬送システム”, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 2017, 1B4-11, 2017.
- [11] M. Endo, et., al, “Trajectory Generation for Multiple Robots of a Car Transportation System”, *Distributed Autonomous Robot and Systems 9*, pp.305-314, 2008.
- [12] 遠藤, 他, “複数ロボットを用いた車両搬送システム iCART (第 1 報:車両搬送ロボットの設計と制御)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.75, No.755, pp.2028-2035, 2009.