

倒立振り子機構に基づく階段昇降ロボットの設計

友國伸保

A Design of Stair-climbing Personal Mobility Robot Based on Inverted Pendulum Mechanism

Nobuyasu TOMOKUNI*

synopsis

In this paper, an inverted pendulum type personal mobility robot with virtual wheel is described. The robot enables to climb a stairs only with two virtual wheels consist of one rotary link and two wheels which are attached to the both ends of the rotary link. The mechanical dimensions of the rotary link and tire restrict applicable step size. Therefore these mechanical dimensions are delivered by an analysis based on Building Code.

keywords: Inverted pendulum, personal mobility

1. はじめに

本稿では、倒立振り子機構に基づく階段昇降ロボットの機構設計について述べる。

近年の高齢化の進行等により、移動補助を必要とする人口は今後増加してゆくと考えられる。これまで、身体機能低下を補うための移動補助機材として車いすが用いられることが多かったが、車いすには以下のような問題点が存在する。

- ・補助輪の干渉による走行性能の低下。

車いすの多くが動輪2個と小径補助輪2つの4輪構成を取るため、補助輪が段差等に引っかかる、あるいは段差に乗り上げ、動輪が浮いてしまうことにより、走行不能となる場合がある。

- ・フットプリント（専有面積）の問題

移動補助に用いる目的のため、車いすには高い安定性が求められる。特に左右方向の傾斜上での横転が起きないように左右車輪の間隔であるトレッドは一定以上を保つ必要がある。このことと、4輪を配置する関係上、一定以上の専有面積が必要となり、狭隘な空間での移動は困難となる。

一方、近年の慣性センサやマイクロプロセッサの性能向上により、Segway^[1]といった倒立二輪型移動体が実用化している。倒立二輪型移動体は接地輪が動輪二輪のみで構成されるため、従来の車いすのような機構に比べフットプリントを小さくでき、小型の移動体を構成可能である。

しかしながら、これまで提案された倒立二輪移動体はすでに倒立している移動体へ乗り込む必要があるため、立って乗る方式の物が多く、長時間の使用は疲労を伴う。

この問題に対し、これまでに着座方式の倒立二輪移動体であるPMR^[2]が提案され、筆者らはその制御について研究を行っている。PMRの機構の概要を図1に示す。PMRにはレグリンクと呼ばれる回転リンクと回転リンクの先端に取り付けられた動輪から構成される左右独立の脚車輪機構が装備されている。この脚車輪機構とシートの前後移動を可能とするシートスライダを組み合わせて用いることで、車いす同様の静的安定状態から立ち上がり、倒立二輪状態へ移行することを可能としている(図1(a))。また、倒立移動時には左右独立にレグリンクを上下することにより、左右方向傾斜上でもシートをほぼ水平に保つことが可能となっている(図1(b))。

*近畿大学工学部知能機械工学科

Dept. of Intelligent Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering, Kinki University

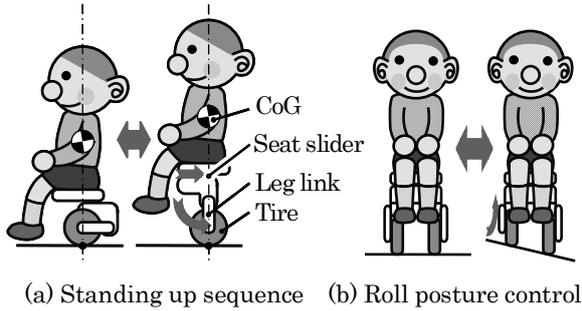


Fig. 1 Leg link architecture

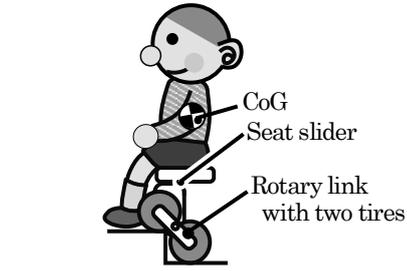


Fig. 2 Inverted pendulum type mobility with virtual wheel

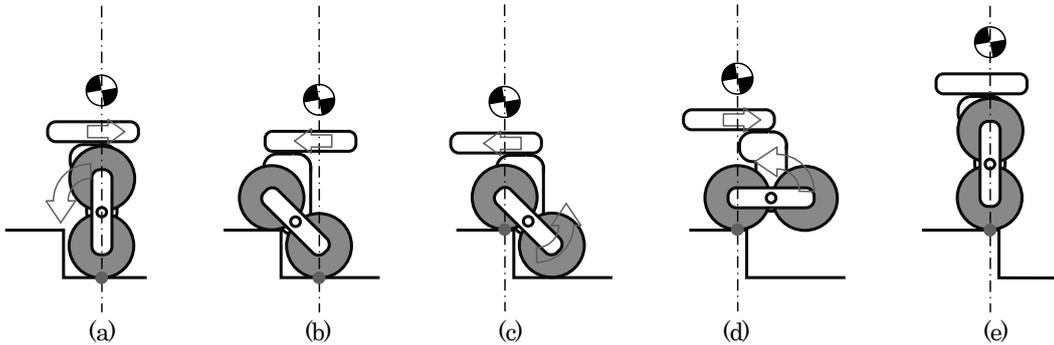


Fig. 3 Sequence to climb stairs.

シートが水平に保たれることにより、横方向傾斜上でも横転のリスクを軽減することが可能なため、トレッドを小さくでき、専有面積を軽減可能なため、狭隘な場所でも移動可能である。

本稿では、シートスライダと脚車輪機構を用いる倒立二輪移動機構をベースに仮想車輪機構を用いることで、従来の車いすや倒立二輪移動体では移動困難であった段差や階段への対応を可能とする機構の提案を行い、その機構に必要なパラメータについて検討を行う。

2. 倒立振り機構を用いた階段昇降機構

2 輪からなる仮想車輪を用いることにより階段昇降を可能とする倒立振り型移動体の機構を図 2 に示す。仮想車輪とは、複数の車輪を組み合わせることで、1 つの車輪として用いる機構である。倒立状態で仮想車輪機構とシートスライダを用いることにより倒立支点の切り替えを行い、タイヤの踏み替えを実現する。

段差を上る場合の手順を図 3(a)~(e) に示す。図 3 中のタイヤと地面との点は、倒立制御の支点位置を表す。図 3 のそれぞれの手順は、(a) 左右二輪倒立状態で段差の直前まで移動し、回転リンクを前方へ回転させる。このとき機体の重心を倒立支点上に維持するために、シートスライダを後退させる。(b) 上側のタイヤが接地すると下側のタイヤと併せて左右 2 か所で接地することとなり、静的安定状態となるため、倒立制御を打ち切る。このとき、スライダを前進させ、機体全体の重心を上側タイヤの接地点上方へ移動

させる。(c) 倒立支点が上側タイヤの接地点へ移動した後、再び倒立制御を行い、上側タイヤを支点として回転リンクをさらに回転させるとともにシートスライダを前進させる。(d) 回転リンクが水平になった後は、シートスライダを後退させる。(e) 以上の手順により、段差を登る。階段の場合は段数分(a)~(e)を繰り返す。

静的安定性を保ったまま階段を上る、車輪付き回転アーム機構³⁾やロッカーボギー機構では、機体が前後方向へ長くなり、機体サイズが大きくなりがちであるが、本機構では倒立移動のメリットを活かし、専有面積を小さく保つことが可能である。

3. 機構パラメータの設計

図 2 に示される仮想車輪機構において、タイヤの半径 r mm、回転リンクで接続される 2 つのタイヤ間の距離 l_r mm および回転リンクの幅 l_w mm によって対応できる段差形状が制限される。本項では段差の形状を建築基準法⁴⁾における中学校、高等学校、講堂などの階段の寸法規定に基づき仮定する。建築基準法による階段形状を図 4 に示す。本稿

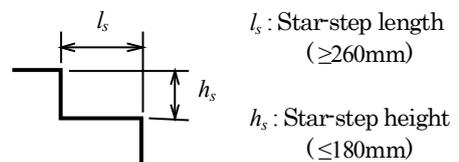


Fig. 4 Applicable step size

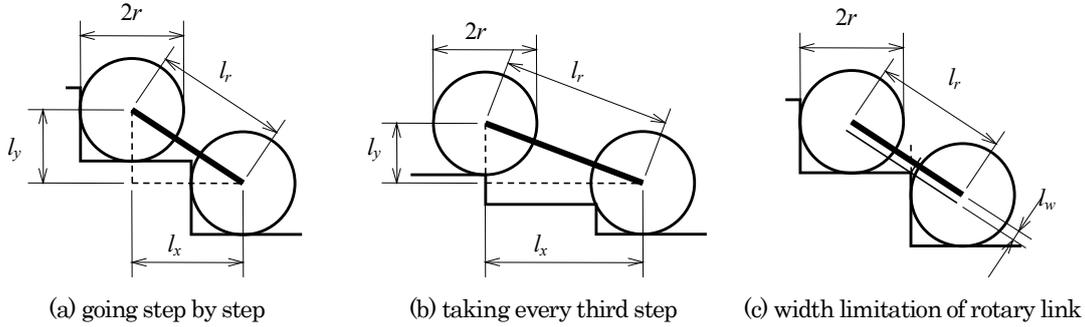


Fig. 5 Limitation for mechanical dimension

では図4に示されるように、階段の蹴上げの高さを180mm以下、踏み面の長さを260mm以上と仮定する。

3.1 タイヤサイズと回転リンク長さ

図5(a)に仮想車輪機構を用いて一段ずつ階段を上る場合の条件を示す。一段ずつ階段を上る場合、回転リンクの最大長さの垂直方向成分 l_y と水平方向成分 l_x はそれぞれ、階段の蹴上げ高さ h_s と踏み面の長さ l_s に一致する。従って、

$$l_r^2 \leq h_s^2 + l_s^2 \quad (1)$$

長さは負になり得ないため

$$l_r \leq \sqrt{h_s^2 + l_s^2} \quad (2)$$

ここで、 h_s の下限値を0とすると(2)式より

$$l_r \leq l_s \quad (3)$$

また、このとき、仮想車輪機構を実現するためには2つのタイヤが同一平面上に無ければならないため、タイヤ半径 r の最大値が次式で規定される。

$$r \leq \frac{l_r}{2} \quad (4)$$

一方、タイヤ半径を0とした場合に、回転リンク長は最小値を取るため、次式が成り立つ。

$$h_s < l_r, \quad 0 < r \quad (5)$$

(2)-(4)式から一段ずつ階段を上る際に必要な回転リンク長さ l_r とタイヤ半径 r の関係は次式のようになる。

$$h_s < l_r < l_s, \quad 0 < r \leq \frac{l_r}{2} \quad (6)$$

車両の移動効率を上げるためには一般にタイヤの半径は大きい方がよい。一段ずつ登る場合のパラメータ最適値は次のようになる。

$$l_r = l_s, \quad r = \frac{l_r}{2} \quad (7)$$

つぎに、図5(b)に仮想車輪機構を用いて一段飛ばして階段を上る場合の条件を示す。一段飛ばしを実現するために

は、

$$\begin{cases} l_x = l_s + r & \text{when } r \leq h_s \\ l_x = l_s + \sqrt{r^2 - (r - h_s)^2} & \text{when } r > h_s \end{cases} \quad (8)$$

$$l_y = 2h_s$$

となるため、回転リンク長さが最短となるのは $r > h_s$ の場合であり、最長となるのは $r < h_s$ の場合である。タイヤ半径が大きくなるのは $r > h_s$ の場合である。このとき、

$$l_r \leq \sqrt{l_s^2 + 2r \cdot h_s + 3h_s^2 + 2l_s \sqrt{h_s(2r - h_s)}} \quad (9)$$

このとき、タイヤ半径は

$$(10)$$

条件を代入して計算すると、

$$l_r > 660 \text{ mm}, \quad r \cong 330 \text{ mm} \quad (11)$$

車両の移動効率を上げるためには一般にタイヤの半径は大きい方がよい。しかしながら、一段飛ばし条件を用いると機構が大きくなりすぎるため、一段ずつ登る場合の最大値を適用することとした。従って、前項の建築基準法条件⁽⁴⁾による蹴上げ高さ h_s と踏み面の長さ l_s を適用すると、次式が求められる。

$$l_r = l_s = 260 \text{ mm} \quad (12)$$

タイヤ半径 r はタイヤ同士の接触を避けるため

$$r = 120 \text{ mm} \leq \frac{l_r}{2} \quad (13)$$

とする。

3.2 回転リンク幅

図5(c)に仮想車輪機構を用いて一段ずつ階段を上る場合の回転リンク幅条件を示す。図5(c)より、次式が求められる。

$$l_w = \frac{r \cdot l_y + (r - h_s) l_x}{l_r} \quad (14)$$

ここで、階段の形状の条件から

$$\begin{cases} l_x = 260 \text{ mm} \\ l_y = 180 \text{ mm} \end{cases} \quad (15)$$

とすると、 l_w は最小値を取り、

$$l_w \cong 46.2 \text{ mm} \quad (16)$$

となる。

4. まとめ

本稿では、仮想車輪機構を倒立二輪移動体に適用することにより階段昇降可能とするための機構の提案と、その機構の設計要件について述べた。本機構を用いることにより、これまでにない小型かつ段差や階段へ対応可能な移動体の実現できる可能性がある。今後、本稿にて提案した機構を実際に製作し、制御の検討を行う。

文 献

- [1] H. G. Nguyen, J. Morrell, K. Mullens, A. Burmeister, S. Miles, N. Farrington, K. Thomas, and D. W. Gage, "Segway robotic mobility platform", *Mobile Robots XVII, Proceedings of the SPIE*, vol. 5609, 2004.
- [2] 友國伸保, 小竹元基, 鎌田実:"パーソナルモビリティロボットの脚車輪を用いた姿勢制御", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009 (Robomec'09), 2009.
- [3] 柳原直人, 元村誠二, 沼倉俊郎, 鈴木夏夫:"車輪付き回転アームによる階段昇降ロボット", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 1996, Vol B, pp.1453-1456, 1996.
- [4] 建築基準法 令第23条、第24条、第27条