

上体運動により階段昇降を実現する車椅子型移動支援機器の開発

A Wheelchair with Lever Propulsion Control for Climbing Up and Down Stairs

○ 佐々木海（筑波大学） 鈴木健嗣（筑波大学）

Kai SASAKI, University of Tsukuba
Kenji SUZUKI, University of Tsukuba

Abstract: We develop a stair-climbing wheelchair based on lever propulsion control using human upper body. It consists of manual wheels with casters for planar locomotion and a rotary-leg mechanism based on lever propulsion that is capable of climbing up/down stairs. The wheelchair also has a passive mechanism powered by gas springs for posture transition to shift the user's center of gravity between the desired positions for planar locomotion and stair-climbing. We focused on the motion and force that can be performed by the wheelchair users, and realize stair-climbing with passive mechanisms using lever propulsion control. In this paper, we present a study on both climbing up and going down using the proposed methodology. Relevant experiments were performed to investigate its performance and verify that the wheelchair users can up/down the stairs independently by the proposed methodology.

Key Words: Stair-Climbing Wheelchair, Lever Propulsion, Upper Body Motion, Life Support

1. はじめに

日本では先天的な障害や交通事故，労働災害などの事故が原因で下肢に運動機能障害を有する者は100万人以上いる⁽¹⁾。下肢運動機能障害者の移動支援機器として車椅子が広く普及しており，特に上体が健全であれば手動式車椅子が使用され，社会生活を送る上で必要不可欠な移動機能を補っている。その一方で，車椅子による移動にとって段差及び階段は大きな障害となっている。例えば，高齢の車椅子使用者は20mm以上の高さの段差を昇ることが困難であると報告されている⁽²⁾。上半身の状態にかかわらず，車椅子使用者単独での段差，階段の昇降は危険を伴うため，介助者が必要となる。このように，車椅子使用者の活動は未だ制限されている。これらの問題を解決するため，階段昇降型車椅子の研究開発が盛んに行われており，これまで数多くのメカニズム⁽³⁾が提案されてきた。これら既存の階段昇降型車椅子は，使用者自身で階段昇降の際に必要な力を獲得するために電動アシスト型が一般的である。しかしながら階段を昇降するために手動式から電動アシスト車椅子に変更するのは，サイズ，重量，及び身体機能維持の観点から好ましくない。

そこで我々は，下肢による歩行や移動は困難であるが，上半身は健全である者を支援対象者とし，車載可能性を考慮して小型化，軽量化を目指し，乗員単独での階段昇降を可能とする新たな移動支援機器を提案してきた⁽⁴⁾。本稿では，提案する階段昇降手法と，車椅子使用者の公共空間での階段昇降の実現可能性を検証するために行った基礎実験について報告する。

2. 提案手法

図1に提案する移動支援機器の使用概略図を示す。この移動支援機器は階段昇降機構，平地移動機構及び受動型姿勢変換機構から構成される。階段昇降機構は回転脚とキャスタ輪を組み合わせた回転脚機構と，それを操作するレバーにより構成し，乗員の上半体運動のみで駆動することを可能とする。また，前方に手動式車輪，後方にキャスタ付回転脚を備えることで，一般的な車椅子と同等の平地移動性能を保つとともに，受動型姿勢変換機構により平地移動時，階段昇降時の二つの異なる姿勢をとることができる。一般的な手動式車椅子を基に全ての構成要素を受動部品とすることで，小型化，軽量化を実現し，かつ多くの階段昇降型車椅子が抱えている平地での移動性能の低下を抑制する。

2.1 入力トルクとレバーによる発生力

階段を一段昇るために必要となる入力トルクと乗員のレバー操作による必要発生力を求める。計算を簡略化するため，階段を一段昇る時のモデルを図2に示す通りとする。乗員，手動式車輪，

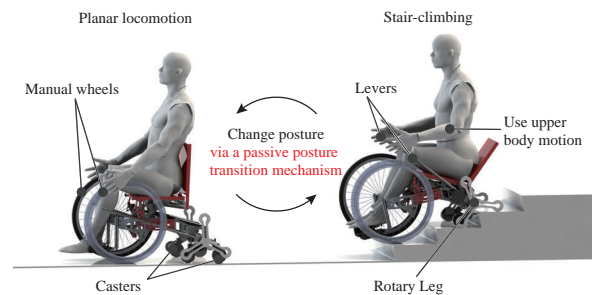


Fig.1 Outline drawing of developed stair-climbing up and down wheelchair

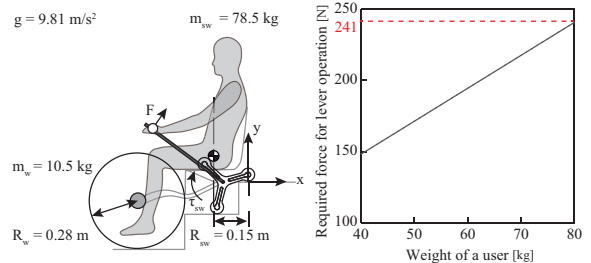


Fig.2 Stair-climbing up model and required force for lever operation according to the weight of a user

回転脚とそれを回転させるレバー，手動式車輪と回転脚をつなぐ軸は，質量の無視できる剛体フレームで回転対偶となるよう接続されていると仮定する。ここではラグランジュの運動方程式を適用し必要発生力を求める。乗員質量を65kg，車椅子質量を24kgとし，乗員を含めた車椅子全体の重量は，ホイールベースの両端に全体重心位置に従い分配されていると仮定する。この時，回転脚の回転軸に作用する重量を m_{sw} [kg]，手動式車輪に作用する重量を m_w [kg]，手動車輪半径 R_w [m]，そして段差踏破時の回転脚接地点から全体重心位置までの水平方向の最大距離を R_{sw} [m]とする。事前研究⁽⁴⁾で求めた全体重心位置を考慮し R_{sw} [m]を0.15とすると，一段階段を昇るために必要な最大トルク τ_{sw} は，以下の式となる。

$$\tau_{sw} > (m_{sw}R_{sw} + m_w R_w)g \approx 144 \text{ Nm}$$

ここでは，車椅子乗員がレバーを動作させることで階段を一段昇る。そこで操作性を考慮し使用するレバーの長さを $L = 0.7$ [m]とすると，乗員に要求される両手によるレバー操作力 F は，

$$F = \tau_{sw}/L \approx 206 \text{ N}$$

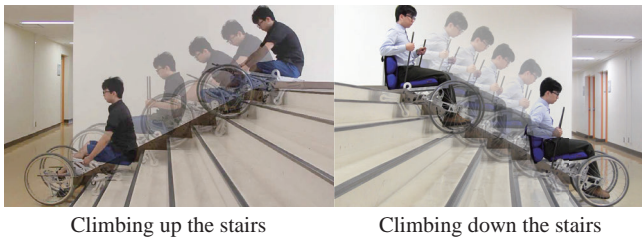


Fig.3 Experiments for climbing up and down the stairs

となる．ここで，階段を一段降りる場合に必要となるレバー操作力については，階段を一段昇る際に必要となる力よりも小さいと仮定する．これは，階段を一段昇る運動は抗重力運動であるのに対して，階段を降りる運動は重力方向に運動しているためである．

乗員の重量による階段を一段昇るために必要なレバー操作力を図2中のグラフに示す．このグラフより，乗員の重量に比例してレバー操作力が増加することが分かる．ここで，乗員が提案するレバー操作を行う時，十分な力を発揮するために上体運動として特に肩屈曲運動をすると考えられる．田中らは，対まひ脊椎損傷男性53名の上体機能を調査した（年齢：18-54；脊椎損傷レベル：T4-L4）⁽⁵⁾．この調査結果によると，対まひ脊椎損傷男性53名の肩屈曲力の平均と標準偏差は20代で 421.8 ± 146.2 N，30代で 446.4 ± 117.7 N，40代で 388.5 ± 74.6 N であることが明らかにされている．このことから，提案する回転脚のレバー操作により使用者単独での階段昇降が実現可能であることが示唆された．

3. 評価実験

まず，公共空間の階段に対する提案手法の有効性を検証するため，20代健康常男性被験者1名により階段昇降実験を行う．本実験は段差蹴上げ160mm，段差踏み面300mm，段差総数8段の階段で実験を行う．図3左に階段を昇る実験の連続図を示す．乗員の適切な重心移動と乗員の上体運動により動作する回転脚機構により，使用者単独で想定した階段を昇ることが可能であることが確認された．次に，同様の実験環境で階段を降りる実験を行う．この実験を行う前に，使用者の安全性を確保するため定格負荷トルク11Nmのトルクダンパを4つ取り付けている．図3右に階段を降りる実験の連続図を示す．移動支援機器が階段を降りる際，トルクダンパにより機器の運動の勢いが緩和され，一段ずつ確実に階段を降りられることが確認された．本実験においては，階段昇降時のレバー操作時に使用者の上体に過度な負担がかからないことが確認された．

さらに，レバー操作に必要な力を計測するため，開発した移動支援機器と，安全性を考慮し人体ダミーを用いて実験を行う．人体ダミー重量は上体，下体それぞれ26.5kg及び16.7kgである．本実験における階段の形状は段差蹴上げ180mm，段差踏み面280mmであり，デジタルフォースゲージ（ZP-1000N，IMADA Co., Ltd.）によりレバー操作力を計測する．計測するレバーの位置は回転脚中心から0.7mの位置とし，レバーの長さ方向に対して常に力の計測方向が垂直となるように実験を行う．図4,5に計測結果を示す．階段を昇る場合について，レバー操作力は段差を昇り始める際に極大となり，その後は減少する傾向が確認された．また前方の手動式車輪が段差を昇り始める際にレバー操作力が最大となる．一方，階段を降りる場合について，レバー操作力は段差を降り始める際に極大となり，その後減少する傾向が確認された．ここで，階段を降りる際に必要となるレバー操作力は，階段を昇る際に必要となる力よりも小さいことが確認された．このことは，2.1項で述べた仮定と一致している．従って提案手法により車椅子使用者単独での階段昇降の実現可能性があると見える．

4. まとめ

本研究では，車椅子使用者にとって移動の障害となる段差及び階段を，使用者の上体機能に着目しそれを活用する受動機構によ

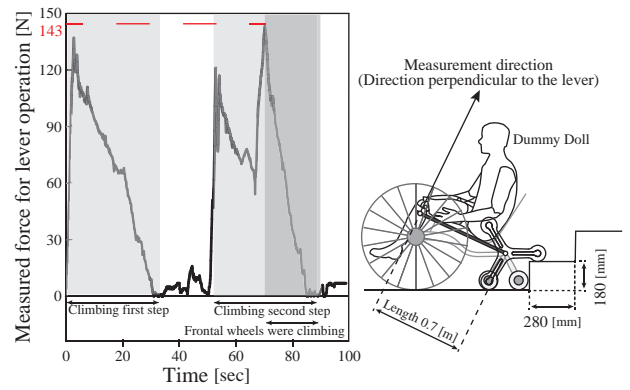


Fig.4 Measured force for lever operation during climbing up the stairs

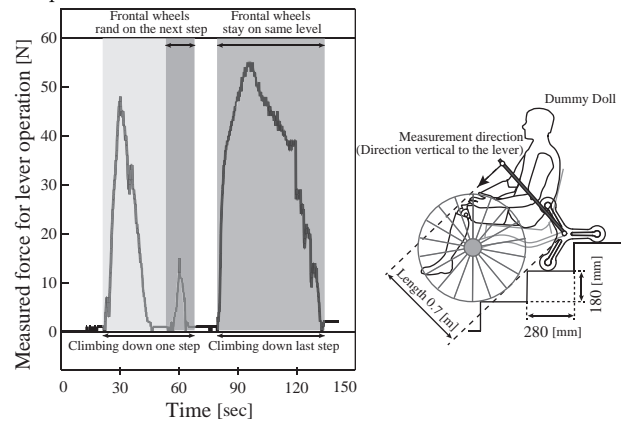


Fig.5 Measured force for lever operation during climbing down the stairs

り使用者単独で昇降できる新しい移動支援機器を提案し，試作機を製作することによりその実現可能性を示した．本研究で開発した移動支援機器により，バッテリーやモータを一切必要とせず，車椅子乗員の姿勢変換と回転脚機構により階段昇降が可能であることを実験を通して確認した．

提案する階段昇降車椅子のレバー操作力について，例えば高齢者や上体の動作に制限のある車椅子使用者にとっては過度な負担となることが考えられる．そのため，レバー操作を支援する手法を検討中である．幅広い使用を考慮し，半自動型の階段昇降車椅子を検討している．今後は開発した移動支援機器での階段昇降において，公共空間に存在する多くの段差，階段に対応できるよう検証を進める．そして，様々な段差及び階段での実験を通して，提案する移動支援機器の有効性を検証していきたい．

参考文献

- (1) "平成18年身体障害児・者実態調査結果"，厚生労働省，pp.3-4，2006.
- (2) 鍋島ら，"車いすを利用する高齢者のための歩道構造に関する研究"，土木学会論文集，Vol. 2003，No. 725，pp.157-169，2003.
- (3) 広瀬ら，"脚車輪型階段昇降車両 Zero Carrier の開発"，日本ロボット学会誌，Vol. 23，No. 3，pp.330-336，2005.
- (4) K. Sasaki et al., "Step-Climbing Wheelchair with Lever Propelled Rotary Legs," *In Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots and Syst.*, pp. 6354-6359, 2015.
- (5) T. Nobuyuki et al., "A Battery of Field Tests for Predicting the General Physical Fitness Level of Male Paraplegics in Active Daily Life," *Japanese Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, Vol. 59, No. 1, pp. 131-142, 2010.