

# ユーザ意図通りに動作する歩行器型車輪付き四足移動ロボットの安定性と障害物回避の両立に関する研究

○花井 彩音（九州大学），吉田 龍史（九州大学），徳永 大悟（九州大学），  
西川 鋭（九州大学），木口 量夫（九州大学）

日常生活環境で高齢者等のユーザの歩行を支援するために、歩行器型車輪付き四足移動ロボットを用いた障害物回避手法について提案する．提案手法では、ユーザの動作意図と歩行安定性を重視し、ロボットの姿勢変化のみで回避可能な障害物はユーザの歩行軌道を変更せずに回避し、ロボットの姿勢変化のみで回避できない場合にはユーザの自然な歩容と歩行安定性を考慮してロボット本体の移動を行うことで障害物を回避する．これにより、ユーザの意図通りに動作しつつユーザの転倒リスクを最小限にした障害物回避を実現する．

## 1. 緒言

近年、我が国では高齢化が進んでいる．高齢者は運動機能の低下により、自立歩行が困難になる場合がある[1]．そのような高齢者のための歩行補助具の1つに歩行器が存在する．歩行器はユーザの歩行安定性を向上させることができるが、日常生活環境での使用には依然として制限がある[2]．そのため歩行器型車輪付き四足移動ロボットを用いて、日常生活環境で高齢者等の歩行支援を実現することを本研究の目的とする．

日常生活環境で高齢者等のユーザの歩行支援を行うためには、ユーザとロボットが転倒しないことを最優先に、ユーザの意図通りの歩行をロボットと共に実現させなくてはならない．また、通常の移動ロボットとは異なり、ロボット本体の中央部にユーザがいるため、ユーザの存在を無視した急なロボットの軌道変更は、ユーザの意図とは異なる歩容への強制変更やロボット内でのユーザとの衝突等の事故につながる危険がある．そのため、ロボットが障害物を回避する場合においても、ロボットの姿勢変化のみで回避可能な障害物はユーザの意図する歩行軌道を変更せずに回避し、ロボットの姿勢変化のみで回避できない場合にはユーザの自然な歩容と歩行安定性を考慮してロボット本体の移動を行うことで障害物を回避することが必要となる．

これまでの移動ロボットの障害物回避では、上述の要件を考慮する必要がなく、ロボット全体が回避するための経路計画が行われるため[3][4]、歩行器ロボットで同様の手法を用いるには何らかの工夫が必要である．また歩行器ロボットの先行研究[5][6]においても、ユーザの自然な歩容を考慮した回避の誘導は行っておらず、歩行中のユーザの支持脚とロボットが衝突する危険性がある．

そこで本研究では歩行器ロボットを用いて、ユーザの意図する軌道と歩容を考慮した障害物回避を行うことで、日常生活環境での歩行支援を実現する手法を提案する．本研究では、3次元的な障害物回避が可能な歩行器型車輪付き四足移動ロボット（図1）を用いることで、ロボットの姿勢変化のみで回避可

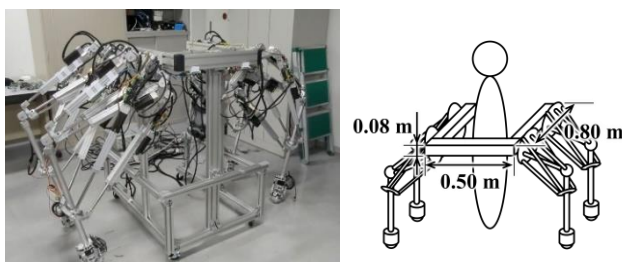


図1 歩行器型車輪付き四足移動ロボットと人が使用するイメージ

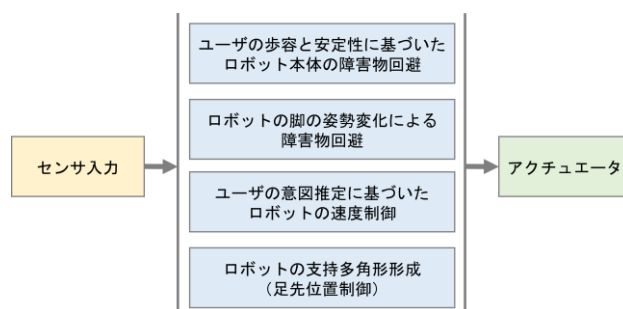


図2 提案手法の制御システム

能な障害物は、ユーザの回避量が最小となるようにロボットの脚の姿勢変化のみにより回避を行う．またロボットの姿勢変化のみで回避できない場合には、ユーザの自然な歩容と歩行安定性を考慮して、歩行中のユーザの遊脚のタイミングに合わせてロボット本体の移動を行うことで障害物を回避する．これにより、ユーザの意図通りに動作しつつユーザの転倒リスクを最小限にした障害物回避を実現する．

## 2. 歩行器型車輪付き四足移動ロボット

本研究では図1に示す歩行器型車輪付き四足移動ロボットを用いる．このロボットは、質量は約 94 kg で、2つのパラレルリンクを組み合わせた6自由度のダブルパラレルリンクで機構[7]となっている．各パラレルリンクは3本のリニアアクチュエータで駆動しており、従来のパラレルリンク機構よりも可動域が広いという特長がある．また冗長な自由度を持つことにより、ユーザを支えるコの字フレームを

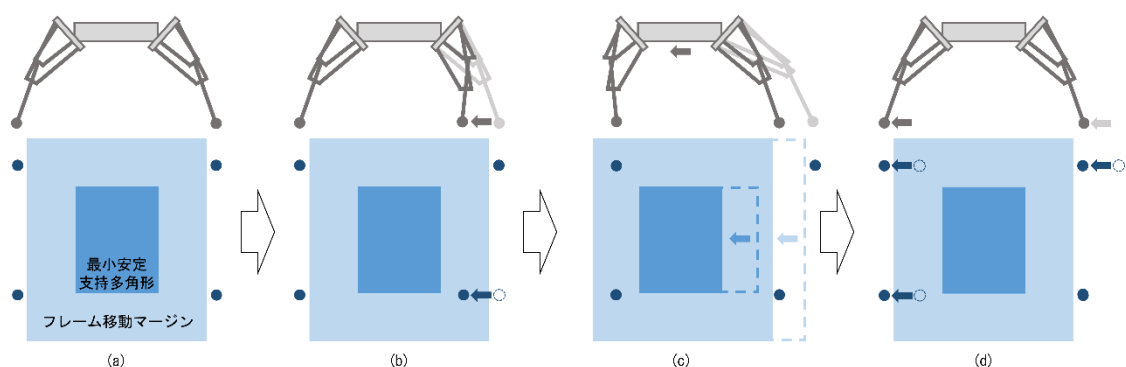


図3 マージンに対するフレーム位置の移動

固定したまま足先のみ移動させるといった動作を実現できる。これらの特長によって、状況に合わせて脚の姿勢を変化させながらユーザの歩行を支援することが可能となる。

### 3. 制御システム

#### 3.1 システム構成

制御にはサブサンプリングアーキテクチャに基づいたシステムを用いる。概要を図2に示す。本研究では足先位置制御とロボットの速度制御に加え、ユーザの意図する歩行軌道を変更せずに回避するためのロボットの脚の障害物回避、ユーザの自然な歩容と歩行安定性を考慮したロボット本体の障害物回避の制御器を設計し、これらの制御器が並列に動作することで、ユーザの意図通りかつ転倒リスクを最小限にした回避を行う手法について提案する。

##### 3.1.1 足先位置制御

ロボットがどのような状況でも転倒しない支持多角形を維持するための足先位置の制御システムを設計した。足先位置を制御するときには、ユーザの意図を妨げないために、ユーザを支えるコの字フレームの姿勢を維持したまま足先だけを動作させることが求められる。なお足先の位置は3.2節で述べる最小安定支持多角形の外側と通常歩行時の脚の配置位置の内側において決まる。

##### 3.1.2 ロボットの速度制御

ロボットはユーザの目標とする速度に合わせて制御を行う。歩行器はユーザの希望通りに動作することが求められ、ユーザの意図を無視したシステムはロボット内でのユーザとの衝突等の事故につながる危険がある。先行研究では3軸力センサ[8]や赤外線センサとレーザレンジファインダ[9]をもとに意図の推定を行っている。

##### 3.1.3 ロボットの脚の障害物回避

高齢者には認知能力の低下もみられ[1]、歩行器を使用した際に壁や物体へ衝突する危険性がある。歩行器型車輪付き四足移動ロボットは、脚を平面方向に自在に動かすことが可能であるため、障害物に最も近い脚のみが回避を行うことができる。そこで人工ポテンシャル法を使用することで各脚が障害物から受ける斥力求め、ユーザのいるロボットのフレー

ムの姿勢を維持したまま障害物の回避を行うことで、ユーザの意図する歩行軌道を変更しない回避を実現する。

斥力はユーザの意図する歩行軌道の先に設けられた代表点における障害物との位置関係から導出する[10]。代表点にかかる斥力のうち冠軸方向の成分のみを障害物に最も近い脚の足先に作用させる。

##### 3.1.4 ロボット本体の障害物回避

障害物から受けた斥力によって脚が内側へと動き続けると、ロボットのフレーム位置を移動させなければ安定性が維持できない状況が起こる。しかしロボットのフレーム部分にはユーザがいるため、むやみな移動はユーザに危険が及ぶ。そこでユーザの自然な歩容と歩行安定性を考慮したロボットのフレーム位置の移動を行うことで障害物を回避する。

ユーザの歩行安定性を維持したままロボット本体が移動を行う上で適切なタイミングについて考える。Hofら[11]は支持脚に対して外側の方向（支持脚が左脚の場合は左方向、右脚の場合は右方向）に外力を加えた場合は歩行安定性が高いことを示している。このことからユーザの支持脚のかかどが接地してから離れるまでの間に外側の方向にゆっくりと力を加えれば、ユーザの姿勢安定性を保ったままフレーム位置を移動させることが可能であると考えられる。そこでロボットが移動したい方向のユーザの脚が支持脚になるまでフレーム位置を固定して待機するためのマージンを設けた。

マージンに対してフレーム位置が動く様子を図3に示す。(a)の初期姿勢から(b)のように左前脚の足先が障害物からの斥力を受けてマージンに侵入してきた場合、ユーザの右脚が支持脚になるタイミングをマージン内で待ったのち、(c)のようにフレーム位置を移動させ、(d)で通常歩行時の脚の配置位置に脚を移動させることで元の姿勢に戻る。この一連の動作によってユーザの自然な歩容と歩行安定性を考慮した障害物の回避を行うことができる。なお設定したマージンの詳細については3.2.2項で述べる。

### 3.2 マージンの設定方法

#### 3.2.1 最小安定支持多角形

この領域はロボットと人が急停止をしても転倒しないことを保障できる最小限の支持多角形であ

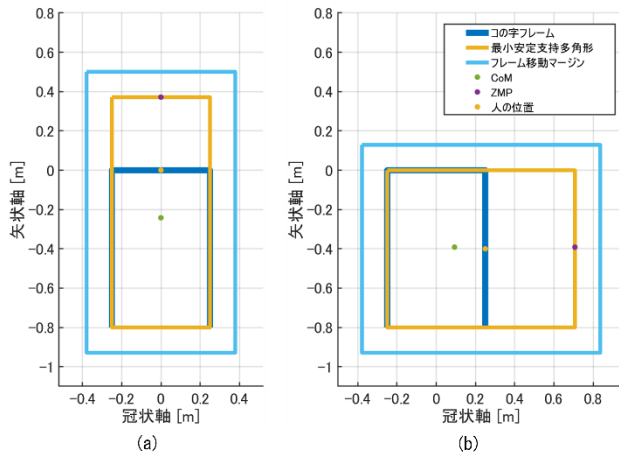


図4 矢状軸(a)と冠状軸(b)の正方向に移動中の最小安定支持多角形とフレーム移動マージン

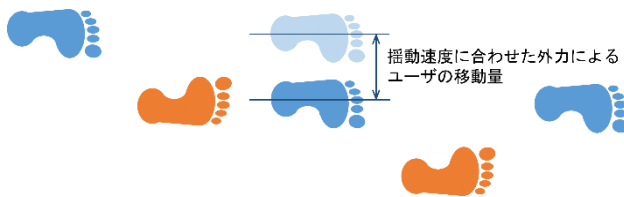


図5 ユーザの重心移動時の足の動き

る。ユーザが存在するフレームの領域と、急停止時の加速度を考慮したゼロモーメントポイント (ZMP) から決定した。ZMP はロボットとユーザを一体とした現在の質量中心 (CoM) の座標と歩行速度から導出した。ここではユーザとロボットを一体と仮定し、急停止時にロボットの姿勢が変化しないものとした。ZMP の導出で用いたユーザの CoM の位置は、身長と体重から文献[12][13]をもとに決定した。

急停止した場合のロボットと人が受ける加速度は姿勢や環境などの条件に大きく左右されるが、今回は最も厳しい条件となるロボットが何らかの物体に衝突して急停止した場合を考えた。自動車の衝突試験を行った文献[14]によると、15.56 m/s で衝突した場合、速度が 0 m/s になるまでの時間は 65 ms、加速度 240 m/s<sup>2</sup> 程度になるという結果がある。この自動車の条件を参考に、歩行速度との比率からロボットと人の衝突時の加速度を仮定した。また人の歩行速度での衝突では、ロボットは弾性変形しながら停止すると考えられる。弾性変形により加速度は減衰されるため、全体の加速度に対してロボットの特性から決まる減衰項  $c$  を考慮する。用いた導出式を式(4)に示す。

$$\mathbf{a}_{\text{com}} = c \cdot \left( \frac{240}{15.56} \cdot \mathbf{v}_{\text{com}} \right) \quad (4)$$

なお  $\mathbf{v}_{\text{com}}$ ,  $\mathbf{a}_{\text{com}}$  は、ロボットと人を一体とした CoM の位置  $\mathbf{p}_{\text{com}}$  の速度、加速度とする。

ユーザが存在するフレーム内に脚が侵入するとユーザがつまずく恐れがある。そこでコの字フレームを地面に投影した領域に加えて、式(4)から導出した現在の速度で急停止した時の加速度により求ま

る ZMP を内包する領域を最小安定支持多角形とした。図4に AIST 人体寸法データベース[13]を参考にユーザの身長 159.6 cm、体重 56.2 kg とし、ユーザが進行方向にフレームに力をかけているときに、矢状軸方向に速度 0.86 m/s で移動した場合 (a) と、冠状軸方向に速度 0.86 m/s で移動した場合 (b) の最小安定支持多角形 (オレンジ線) の例を示す。なお減衰項  $c$  は 0.5 とした。

### 3.2.2 フレーム移動マージン

この領域はユーザの歩容と歩行安定性を考慮して重心位置を移動させるための最小安定支持多角形に対するマージンである。上記の最小安定支持多角形を、歩行速度から決定する変数の値だけ広げるようにして決定した。

前腕支持型歩行器を高齢者が使用した場合の歩行速度は最大約 0.86 m/s である[15]。Owings ら[16]は歩幅と歩隔の関係は年齢に関係なく 1 つの数式で表せることを示している。つまり人の歩行時の揺動速度は矢状軸方向の速度によって決まるといえる。文献[17]では健康者が矢状軸方向に約 1.25 m/s で歩行しているときの冠状軸方向の揺動速度は最大約 0.18 m/s であるという結果が示されている。そのため歩行速度 0.86 m/s のときの揺動速度は、比率から 0.124 m/s と定まる。したがって重心位置を 0.124 m/s 以下で移動させるのであれば、通常の歩行時の揺動速度以下であるため、ユーザの姿勢安定性を維持しながらの移動が可能であると考えた。図5にユーザの揺動速度に合わせてロボットが力を加えることによって、ユーザの歩行軌道が変化するイメージを示す。

歩行速度 0.86 m/s の高齢者の歩行 1 周期の時間は 1.50 s であり[18]、歩行器を使用した場合の支持脚と遊脚の割合はおおよそ 2:1 であることが示されている[19]。したがって歩行速度 0.86 m/s のとき、歩行の 1 周期 1.5 s のうちユーザに外力を加えることができる時間 (支持脚のかかとが接地してから離れるまでの時間) は 1.0 s であることが分かる。これらのデータから歩行速度 0.86 m/s のときのマージンの幅を、重心の揺動速度の波形を sin 波に近似し、振幅を 0.124 m/s とすると 0.0789 m と決まる。この結果を基準に、現在の歩行速度との比率からマージンを決定した。またロボットの制御周期や斥力計算の処理速度などの特性から、計算したマージンにさらに切片  $b$  を持たせた。マージンの幅  $d$  の導出式を式(5)に示す。

$$d = \frac{0.0789}{0.86} \cdot \|\mathbf{v}_{\text{com}}\| + b \quad (5)$$

図4に最小安定支持多角形の計算と同じ条件の場合のフレーム移動マージン (水色線) の例を示す。なお切片  $b$  は 0.05 m とした。

### 3.2.3 通常歩行時の脚の配置

障害物が存在しない通常歩行時におけるロボットの足先位置はフレーム移動マージンの外側にある必要がある。この足先位置はロボットの可動域やアクチュエータのエネルギー効率、から決定する。

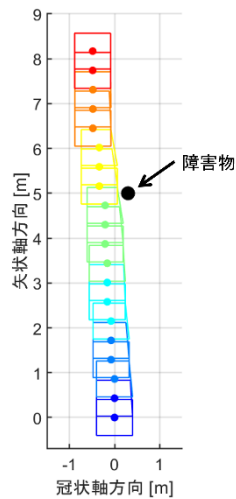


図6 シミュレーションによる障害物回避の結果

#### 4. 検証

MATLAB でシミュレーションを用いて、ロボットの障害物回避による動作を確認した。

##### 4.1 シミュレーション条件

ユーザの意図に沿って  $0.86 \text{ m/s}$  で進行中に、右前方に障害物が存在し、ロボットが障害物からの斥力を受けた状況を想定した。ロボットは足先のインピーダンス制御を行っており、斥力は各脚の足先に作用する。斥力を計算する代表点はロボットの CoM 位置から  $2 \text{ m}$  前方とし、斥力の影響範囲は  $4 \text{ m}$  とした。

##### 4.2 実験結果

シミュレーション結果を図 6 に示す。図の四角形は支持多角形、点はロボットの重心を示している。

$2 \text{ m}$  地点でロボットの右前脚は斥力を受け始める。最初はユーザの回避量が最小となるよう、ロボットは脚の姿勢変化のみにより回避を行う。結果からも右前脚が内側に入った支持多角形が形成されていることが確認できる。その後ロボットの姿勢変化のみで回避できない状態になると、マージンへの侵入量とユーザの歩容に基づいて、ロボット本体の移動で回避する。この結果から、提案手法によってユーザの回避量を最小にしつつ、ユーザの歩容を考慮したロボット全体の回避を実現できることが確認できた。

#### 5. 結言

日常生活環境で高齢者等のユーザの歩行を支援するために、歩行器型車輪付き四足移動ロボットを用いた障害物回避手法について提案した。提案手法では、ユーザの動作意図と歩行安定性を重視し、ロボットの姿勢変化のみで回避可能な障害物はユーザの歩行軌道を変更せずに回避し、ロボットの姿勢変化のみで回避できない場合にはユーザの自然な歩容と歩行安定性を考慮してロボット本体の移動を行うことで障害物を回避する。今回シミュレーションを用いて提案手法の有効性について確認した。

#### 謝 辞

本研究は、JST【ムーンショット型研究開発事業】グランド番号【JPMJMS2034】の支援を受けたものです。

#### 参 考 文 献

- [1] 丸山: “老人の評価”, 理学療法科学, vol. 12, no. 3, pp. 141-147, 1997.
- [2] FW. Van Hook *et al.*: "Ambulatory devices for chronic gait disorders in the elderly," *American Family Physician*, vol. 67, no. 8, pp. 1717-1724, 2003.
- [3] M. Hoy *et al.*: "Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex cluttered environments: a survey," *Robotica*, vol. 33, no. 3, pp. 463-497, 2015.
- [4] A. Loganathan *et al.*: "A systematic review on recent advances in autonomous mobile robot navigation," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 40, p. 101343, 2023.
- [5] M. Martins *et al.*: "A review of the functionalities of smart walkers," *Medical Engineering & Physics*, vol. 37, no. 10, pp. 917-928, 2015.
- [6] M. M. Martins *et al.*: "Assistive mobility devices focusing on Smart Walkers: Classification and review," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 60, no. 4, pp. 548-562, 2012.
- [7] S. Nishikawa *et al.*: "Adjustable Lever Mechanism with Double Parallel Link Platforms for Robotic Limbs," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp 1950-1956, 2022.
- [8] A. Frizzera-Neto *et al.*: "Empowering and Assisting Natural Human Mobility: The Symbiosis Walker," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 34-50, 2011.
- [9] X. Zhao *et al.*: "A smart robotic walker with intelligent close-proximity interaction capabilities for elderly mobility safety," *Frontiers in Neurobotics*, vol. 14, no. 1, pp. 1-8, Oct. 2020.
- [10] Y. Hirata *et al.*: "Motion Control of Passive Intelligent Walker Using Servo Brakes," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 5, pp. 981-990, 2007.
- [11] A. L. Hof *et al.*: "Balance responses to lateral perturbations in human treadmill walking," *Journal of Experimental Biology*, vol. 213, no. 15, pp. 2655-2664, 2010.
- [12] P. de Leva: "Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters," *Journal of Biomechanics*, vol. 29, no. 9, pp. 1223-1230, 1996.
- [13] 河内まき子・持丸正明, 2005 AIST 人体寸法データベース, 産業技術総合研究所 H16PRO 287.
- [14] S. Hoffenson *et al.*: "On the impact of the regulatory frontal crash test speed on optimal vehicle design and road traffic injuries," *International Journal of Vehicle Design*, vol. 63, no. 1, pp. 39-60, 2013.
- [15] D. Fujita *et al.*: "The Influence of Rollators with Forearm Support on Walking Speed, Endurance and Dynamic Balance," *Journal of Physical Therapy Science*, vol. 24, no. 8, pp. 667-670, 2012.
- [16] TM. Owings *et al.*: "Step width variability, but not step length variability or step time variability, discriminates gait of healthy young and older adults during treadmill locomotion," *Journal of Biomechanics*, vol. 37, no. 6, pp. 935-938, 2004.
- [17] B. Horsak *et al.*: "Overground walking while using a virtual reality head mounted display increases variability in trunk kinematics and reduces dynamic balance in young adults," *Virtual Reality*, vol. 27, pp. 3021-3032, 2023.
- [18] F. Fallahtafi *et al.*: "Trunk Velocity Changes in Response to Physical Perturbations Are Potential Indicators of Gait Stability," *Sensors*, vol. 23, no. 5, p. 2833, 2023.
- [19] A. Ramp *et al.*: "Inertial Sensor-Based Stride Parameter Calculation From Gait Sequences in Geriatric Patients," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 62, no. 4, pp. 1089-1097, 2015.