

ヒューマノイドロボットのための着地衝撃吸収と位置制御の 両立可能な抵抗力可変MRダンパの設計

Design of an MR Damper with Variable Resistance Force for Realizing Both Landing Impact Absorption and Position Control of Humanoid Robots

○関根知晴*, 安孫子聡子*, 辻田哲平**

○Tomoharu Sekine*, Satoko Abiko*, and Teppei Tsujita**

*芝浦工業大学, **防衛大学校

*Shibaura Institute of Technology, **National Defense Academy.

キーワード : ヒューマノイドロボット (humanoid robots), MR ダンパ (MR Damper),
閉リンク機構 (closed-link mechanism), 衝撃緩和 (shock-absorbing)

連絡先 : 〒 135-8548 東京都江東区豊洲 3 丁目 7-5 芝浦工業大学 工学部 電気工学科
安孫子聡子, Tel.: 03-5859-8209, E-mail: abiko@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

昨今、災害現場で人間に代わり救助や復旧作業に従事する災害対応ロボットの活躍が期待されている。災害対応ロボットの競技会の一つである DARPA Robotics Challenge¹⁾ は、実際の災害現場でのロボットによる作業に焦点を当てた競技会であり、その中で設定されたタスクは一般的に人間が行う作業であった。そのため、参加研究チームの多くがヒューマノイドロボットを採用した。同競技会以降、ヒューマノイドロボットの意義が再認識され、その開発・研究が盛んに行われている。しかし、ロボット自身を災害現場に送り届ける方法についての議論は少ない。特に、実際の災害現場では、道路や橋の寸断・陥没による路面状況の悪化が予想され、陸路により現場へのロボット投入は難しい。同

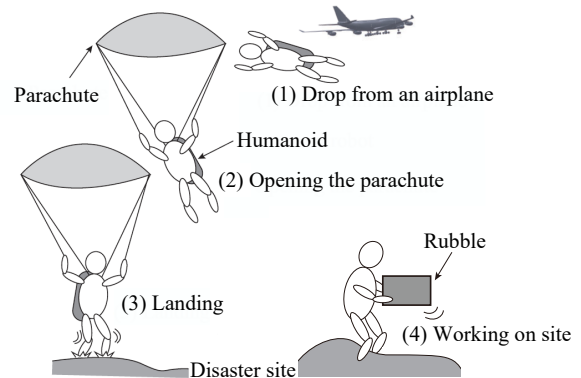


Fig. 1 Parachute descent of a humanoid robot²⁾.

問題の解決法として、TsujitaらはFig. 1に示すように、上空からロボットをパラシュートで投下する手法を提案した²⁾。しかし、パラシュート降下における最も困難な課題は、着地時の大

衝撃の吸収である。一方、災害現場において迅速な救助作業を行うためには、ロボットの精密な位置制御を実現しなければならない。

そこで、本研究では、パラシュート降下着地時のような大衝撃の緩和と精密な位置制御という二つの相反する仕様を実現するヒューマノイドロボットの脚部設計を行う。従来の脚部の衝撃吸収機構としては板バネやゴムなどが用いられてきたが、衝撃吸収性能を優先させ剛性を低くすると、位置精度が低下するというジレンマがあった。そこで、本研究では、機能性材料であるMR (Magneto-Rheological) 流体を活用したMR ダンパをヒューマノイドロボットの脚部に搭載することで、衝撃吸収性能と位置制御性能の両立を目指す。MR ダンパは内部に封入したMR 流体への印加磁場強度を変化させることで抵抗力を変化させることができるダンパである。そこで、高所からの落下時などの衝撃を吸収したい場合は、MR 流体に磁場を印加せずにMR ダンパが自由に撓動できるようにし、粘性要素によって運動エネルギーを散逸させる。一方、精密作業時には、MR 流体に磁場を印加し、MR ダンパの撓動を制限することで、高い位置精度を実現する。

本稿では、これらのヒューマノイドロボットの運動状態に合わせたMR ダンパの設計および開発について述べる。

2. ロボット脚部の開発

2.1 ロボット脚部の構造

シリアルリンク機構で構成されたロボットの膝部だけに柔軟関節を用い、着地衝撃の解析³⁾が行われてきたが、シリアルリンク機構で多自由度の脚を構成すると、足底部のアクチュエータに衝撃を緩和することが難しいという課題や俊敏な動作が困難という課題があった。そこで、本研究では閉リンク機構を用い、着地衝撃吸収機構を有するロボット脚部を開発する。閉リン

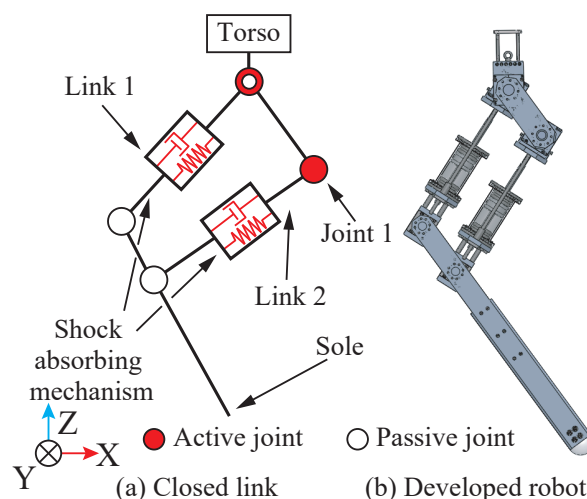


Fig. 2 Closed link robot.

ク機構を有する脚部として、Agility Robotics社製二脚ロボット Cassie⁴⁾の脚構造を参考に、Fig. 2 (a)に示すようにアクチュエータを胴体近傍に配置することで足底部のアクチュエータをなくし、耐衝撃性、俊敏性を向上させた閉リンク2自由度ロボットを構成することとする。Fig. 2 (a)のさらに、本研究では大衝撃の緩和のために、大腿部にダンパとばねが並列に接続された衝撃緩和機構を導入する。ダンパは第1章で述べたとおり、衝撃緩和と精密な位置制御を両立することを目指し、可変ダンパを搭載する。ここでは、可変ダンパとしてMR 流体を用いたMR ダンパの採用を検討する。開発方針として、まず衝撃緩和が効果的に発揮できる衝撃緩和機構の配置を動力学シミュレーションで検討する。その後、その配置において精密な位置制御を可能とする可変ダンパの要求仕様をまとめ、その設計仕様に基づきMR ダンパの開発を行う。

2.2 衝撃緩和機構の搭載部の検討

まず、衝撃緩和機構の配置位置の決定を動力学シミュレーションにより検討する。Fig. 2 (a)に示す閉リンク機構を採用することで膝より先の2自由度は受動関節、腰および骨盤部に能動関節が配置される。この能動関節に直接衝撃が

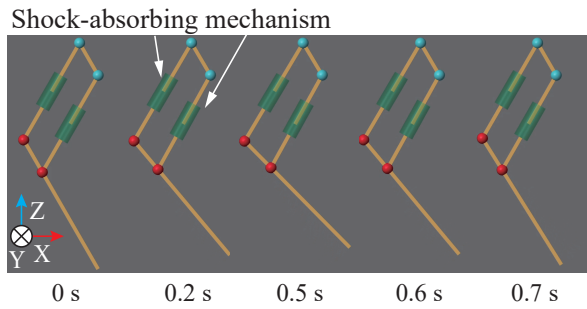


Fig. 3 Snapshot of Case 4 simulation.

加わらないように衝撃緩和機構を配置することが望まれることから、大腿部である Link 1 および Link 2 への搭載が必要と考えられる。そこで、まず (1) 衝撃緩和機構を搭載しない場合、(2) Fig. 2 (a) に示す Link 1 のみに搭載した場合、(3) Fig. 2 (a) に示す Link 2 のみに搭載した場合、(4) Link 1 と Link 2 両方に搭載した場合の 4 つのケースについて動力学モデルを構築し、衝撃緩和の効果を検証した。動力学モデルでは、配置位置による衝撃力緩和の効果を検討するため、単純な線形バネダンパ機構を衝撃緩和機構とした。そのときのバネ定数は 100 N/m、ダンパ係数は 1000 N/(m/s) とした。シミュレーションでは、Sole 部 Z 軸方向に先行研究で計測したロボット落下時に発生する衝撃 500 N を付加し、その際の Joint 1 の角加速度を比較することで衝撃緩和機構の有効性を評価する。

Fig. 3 にケース (4) の衝撃緩和機構の配置の場合の脚部の運動を示す。また、Fig. 4 に各ケースにおける Joint 1 の最大角加速度を示す。Fig. 4 よりケース (4) の Link 1 と Link 2 の両方に衝撃緩和機構を搭載した場合が最も衝撃が低減できていることが確認できた。Fig. 2 (b) に上記結果を踏まえて開発したロボット脚部の 3D CAD 図を示す。

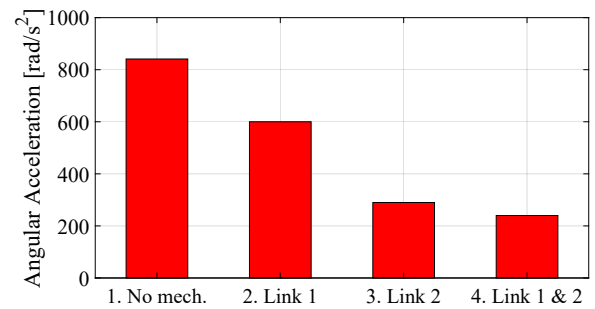


Fig. 4 Angular acceleration of Joint 1.

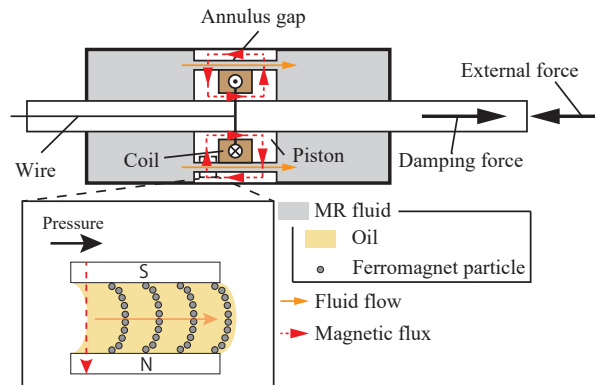


Fig. 5 MR damper mechanism.

3. 衝撃緩和用 MR ダンパの開発

3.1 MR ダンパ

前章で衝撃緩和機構を大腿部に搭載することの有用性が示された。本研究では、衝撃緩和に加え、位置制御を実現するために、ダンパ機構として MR ダンパを採用することを提案する。MR ダンパとは、機能性流体の一つである MR 流体が充填されている直動ダンパである。MR ダンパの構造を Fig. 5 に示す。MR 流体は絶縁性オイルに主に鉄系粒子を混合した固液混合材料であり、磁場を印可することで鎖状クラスタを形成し、流動抵抗が大きくなる。この特性を利用して、MR 流体に印可する磁場を変化させることで MR 流体のレオロジ特性を変化させ、ダンパの抵抗力を制御することが可能となる。ここでは、この MR ダンパを衝撃緩和機構に用いることで、大衝撃発生時は磁場を印加せず抵抗力を小さくすることで MR ダンパが自由に摺動できるようにし、粘性要素によって運動エネ

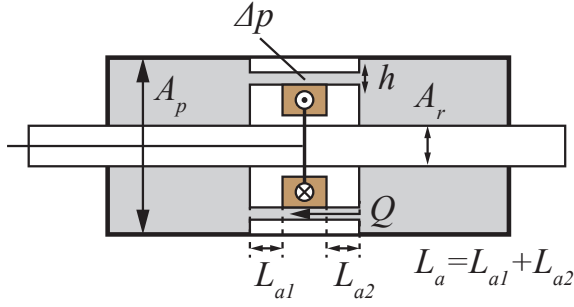


Fig. 6 MR damper parameter.

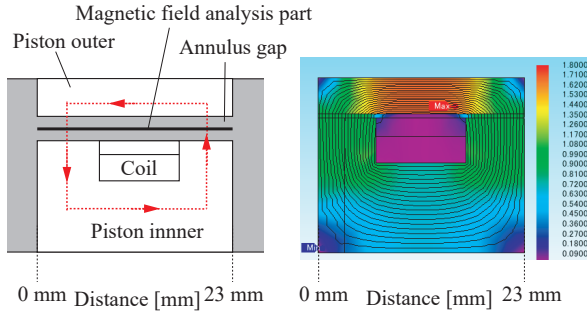


Fig. 7 Magnetic field analysis with simple model.

ルギを散逸させる。一方、歩行等の作業時にはMR流体に磁場を印加し、抵抗力を大きくすることで、MRダンパの摺動を制限し、高い位置精度を実現することが可能となると期待できる。

3.2 衝撃緩和用MRダンパの設計

衝撃吸収と位置制御をMRダンパで両立するためには、無磁場時のMRダンパの抵抗力和磁場印加時のMRダンパの発生しうる抵抗力を検討する必要がある。Fig. 5に示すように、MRダンパの抵抗力はコイルが巻かれたピストンと外壁間の流路をMR流体が通過する際に生じる。同抵抗力は、印加磁場によって変化し、その抵抗力は下記の式で表され、下記式で用いるダンパのパラメータはFig. 6の通りである⁵⁾。

$$F_d = (A_p - A_r)\Delta p, \quad (1)$$

$$\Delta p = \frac{\tau_0}{3h} L_a (3+S) \left[2 \cos \left(\frac{1}{3} \text{atan2}(y, x) \right) + 1 \right], \quad (2)$$

$$S = \frac{12\mu Q}{wh^2\tau_0}, \quad (3)$$

$$x = -27 + 27S + 9S^2 + S^3, \quad (4)$$

$$y = 6\sqrt{3}\sqrt{27S + 9S^2 + S^3}, \quad (5)$$

$$Q = (A_p - A_r)v, \quad (6)$$

ここで、 F_d がダンパの抵抗力を示し、ピストンで区切られた両側の部屋の圧力差と、ピストン断面積とピストンロッド断面積差分の積で表される。 A_p と A_r はシリンダとピストンロッドの断面積であり、 τ_0 は流体の降伏応力である。 h は流路部の幅、 L_a は有効長、 μ は流体粘度、 w は流路の平均直径、 v はピストン速度である。ここで τ_0 は流体に印可される磁場によって変化し、 Δp に影響する。そのため、抵抗力は印可される磁場によって大きく変化する。また、 h を変化させることでヨークの働きをするピストン外郭との距離が変化するため、印可される磁場も変化する。そのため、流路幅を変化させることで抵抗力が変化する。

ここで、衝撃吸収性能と位置制御性能の両立を目指し、流路の幅を変更することで、両機能の実現可能なダンパの設計を行う。抵抗力導出に用いる τ_0 は流路部への印加磁場に依存するため、流路部の磁場解析を行う必要がある。そこで、ダンパ流路部の磁場解析を行った。磁場解析にはJSOL社製磁場解析ソフトウェアJMAG-Designerを用いた。流路幅を0.1 mmから2 mmまで、0.1 mmごとに変化させ、磁場印可時のMR流体部の磁束密度を計測した。磁場計測の際には簡易化したモデルを用いている。モデルの図と磁場解析の様子をFig. 7に示す。また、磁場解析結果をFig. 8に示す。Fig. 8の横軸は、Fig. 7に示しているように、ピストン部の距離としている。結果より、流路幅を大きくすると磁束密度が弱くなる傾向が確認できる。また、10 mm程度で磁束密度が小さくなっているが、これはFig. 7より、コイル上部ではピストン外郭に磁場が集中しているためである。解析結果より、流路幅が狭くなると抵抗力が大きくなりすぎてしまい、過剰な抵抗力が発生する可能性も

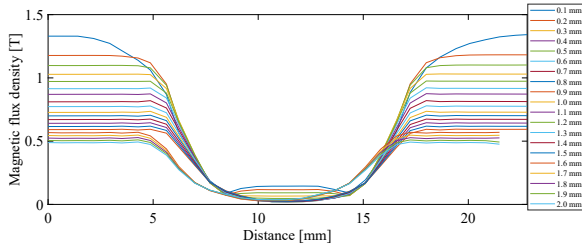


Fig. 8 Magnetic flux density for gap lengths from 0.1 mm to 2 mm.

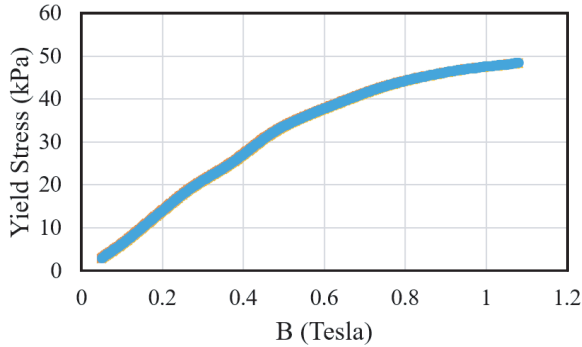


Fig. 9 Relationship between yield stress and magnetic flux density of MRF132-DG⁶⁾.

あるため、適切な印加磁場と抵抗力の関係を導出するための流路幅の決定が必要となる。

そこで、次に磁場解析の結果を用いて、降伏応力 τ_0 を導出した。 τ_0 と磁束密度の関係を Fig. 9 に示す。導出した τ_0 と式 (1)–式 (6) を用いて導出した抵抗力と流路幅の関係を Fig. 10 に示す。立脚時とロボットの落下時の速度をそれぞれ 0 m/s および 3.13 m/s とし、ダンパのピストン速度を設定した。 Fig. 10 より、磁場を印可した際に抵抗力が増加し、流路幅が広くなるにつれて非線形的に抵抗力が減少していることが確認できる。

ここで、所望のダンパの性能を発揮する流路幅を決定するために、落下シミュレーションを行った。 Fig. 2(b) に示すロボットを高さ 1 m から落下させ床面と衝突させた。シミュレーション結果を Fig. 11 に示す。シミュレーション結果より約 3100 N の衝撃力が発生していることが確認できた。また、Lohmeier らは等身大ヒューマノイドロボットロボット LOLA を開発し、歩

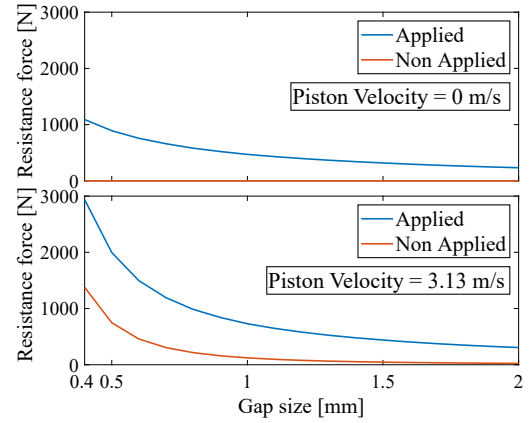


Fig. 10 Relationship between the gap size and resistance force.

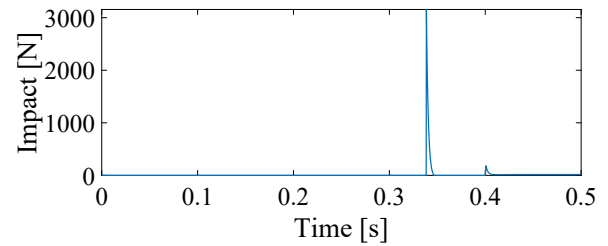


Fig. 11 The result of the robot drop simulation.

行時に約 1000 N の衝撃が生じていることが示した⁷⁾。そこで、本研究では磁場印加時は 1000 N 以上の抵抗力で支え、無磁場時は約 3100 N 以下の抵抗力で衝撃を吸収することを想定する。そのため、 Fig. 10 より、流路幅を 0.4 mm と決定する。

Fig. 12 に開発したダンパを示す。今後、設計手法の妥当性の確認のために、このダンパに MR 流体を充填し、減衰係数での設計手法の評価、立脚時と落下着地時を想定した基礎検証実験を行う。

4. おわりに

本論文では、衝撃緩和と位置制御を両立する脚部の開発を目指した衝撃吸収機構用 MR ダンパの開発とロボット機構の提案を行った。ロボット機構として閉リンク機構を採用し、搭載部の違いによる衝撃吸収機構の効果を動力学シミュ

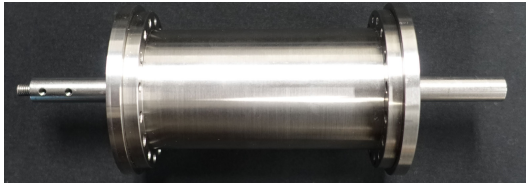


Fig. 12 MR damper mechanism.

レーションにより検討した。シミュレーション結果にもとづき、衝撃吸収機構を2箇所を搭載できる閉リンク機構脚部ロボットを設計した。次に、衝撃吸収機構にMRダンパを採用することを提案した。ダンパの簡易モデルを用いて磁場解析を行い、先行研究の理論から抵抗力を算出した。その後、衝撃吸収性能と位置制御性能の両立を目指し、先行研究とシミュレーション結果を比較することで流路の幅を決定した。決定された流路の幅を用いて、実際のMRダンパを開発した。

今後の展望として、設計手法の妥当性の確認と、立位姿勢の保持と落下時の衝撃緩和について、開発したMRダンパを用いて実験を行い、検証を行う。

謝辞

本研究は競輪 2022M-268 の助成を受けて実施された。

参考文献

- 1) E. Krotkov, *et al.*, “The DARPA Robotics Challenge Finals: Results and Perspectives,” *Journal of Field Robotics*, **34-2**, 229/240, (2017).
- 2) T. Tsujita, *et al.*, “Drop Test for Evaluating Effect of Cushioning Material and Servo Gain on Parachute Landing Impact Using a Small One-Legged Robot,” *Proc. of the 2017 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, 2474/2479, (2017).
- 3) Y. Hidaka, *et al.*, “Drop Impact Analysis and Shock Absorbing Motion of a Life-Sized One-Legged Robot with Soft Outer Shells and a Flexible Joint,” *Proc. of IEEE/ASME Int.*

Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, 928/933, (2020).

- 4) X. Xiong *et al.*, “Bipedal Hopping: Reduced-order Model Embedding via Optimization-based Control,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 3821/3828, (2018).
- 5) J. Goldasz *et al.*, “Insight into Magnetorheological Shock Absorbers,” Springer, (2015).
- 6) LORD Corporation, “LORD TECHNICAL DATA MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid”.
- 7) S. Lohmeier *et al.*, “Humanoid Robot LOLA,” *Proc. of the 6th IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, 775/780, (2009).