

受動跳躍

Passive Dynamic Hopping

永瀬純也*

* 龍谷大学

Jun-ya Nagase*

* Ryukoku University

1. はじめに

カンガルーやワラビーのようなホッピングは、起伏の多い地形や飛び石なども軽快に移動できる。また、動物学者による研究において、ホッピングする哺乳類のいくつかの種は、高速時のエネルギー消費量が4脚動物に比べて低いことが動物実験によって明らかにされている[1]~[4]。エネルギー効率が高い理由の一つに、着地時の衝撃エネルギーを脚のアキレス腱に弾性エネルギーとして吸収して蓄え、そのエネルギーを次の跳躍に積極的に利用していることが挙げられる[5]。

このようなバネ特性を積極的に利用したホッピングロボットがこれまでに数多く開発されている。なかでも安定化制御に特徴を持つホッピングロボットとしては、Raibertの先駆的研究がまず挙げられる。Raibertは、足の接地位置制御による前進速度の制御、胴体の姿勢制御、および接地期の脚の軌道が鉛直線に対して対称となる制御、これらの3つから構成されるシンプルな制御方法[6]を提案し、1脚型の跳躍機により非常に安定した2次元跳躍[7]および3次元跳躍[8]を実機で実現した。また、Geyerら[9]とGhigliazzaら[10]の数値シミュレーションでは、飛行中の床に対する脚角度をフィードバック制御して脚の着地角度を制御することにより安定化制御を実現している。また、ZeglinとBrown[11],[12]は、弓形状の脚を持つ跳躍機において、離散フィードバック制御を用いて飛行中の脚角度と運動エネルギーを調整することで効率的な2次元跳躍を実現した。

そのような中で本研究では、エネルギー効率の優れたホッピングロボットの実現を目指して、センサやモータ、制御の必要のない受動的ロコモーションによって安定したホッピングをおこなう受動跳躍の研究に取り組んでいる。本稿では、受動跳躍の安定性ならびに開発中の受動跳躍機について解説する。

2. 受動的ロコモーションのリミットサイクル

受動的ロコモーションの重要な性質にリミットサイクルがある。安定なリミットサイクルが存在すれば、状態はリミットサイクル上を遷移する。また、小さな摂動が加わっても軌道がリミットサイクル近傍にある限り、再びリミットサイクルに収束する。安定なリミットサイクルは、受動歩行[13]と受動走行[14]において数値シミュレーションにより確認されているものの、受動跳躍についてはこれまでに確認されておらず、不安定とされている。(ここでの「跳躍」は、すべての脚が同位相で運動し、立脚相と飛行相が存在する脚移動を意味する。)

受動跳躍の安定性は、最初にRaibertによって調べられた。胴体、脚、股関節バネおよび脚バネから構成される1脚跳躍モデル[15](以下、Raibertモデル)を使って、数値シミュレーションを行った結果、周期軌道は不安定であった。また、Hyon[16]やLei[17]によって数値シミュレーションによりポアンカレ写像の不動点(Fixed Point)の安定性解析がなされたが、いずれも不安定であった。しかしながらこれらはすべてエネルギー保存系である。

散逸系では、Stiesbergら[18]が、彼らが製作した受動跳躍機の安定性を数値シミュレーションにより調べた。結果、中立安定に非常に近い周期解は得られたものの、安定なリミットサイクルは見つからなかった。しかしながらこの安定性解析では、製作した跳躍機以外の物理パラメータでの安定性は検証されていない。

上記を含め、散逸系の受動跳躍モデルで十分に安定性解析がなされた報告例は筆者の知る限り見当たらない。そこで本研究では、Raibertモデル[15]の脚バネにダンパを付加した散逸系モデルで受動跳躍の安定性解析を試みることにした。

3. 数値シミュレーション

3.1 受動跳躍モデル

受動跳躍の安定性を十分に検証することは、力学モデルの複雑さゆえに容易ではない。そこで第一段階として、胴体の慣性モーメントを無限大とおくことで胴体の回転運動が拘束された受動跳躍モデル(図1)の安定性を解析した。このモデルはRaibertモデルとは異なり、胴体の姿勢の安定

キーワード: Passive dynamic locomotion, Monopedal hopping

* 〒520-2194 滋賀県大津市瀬田大江町横谷 1-5

* Otsu-shi, Shiga

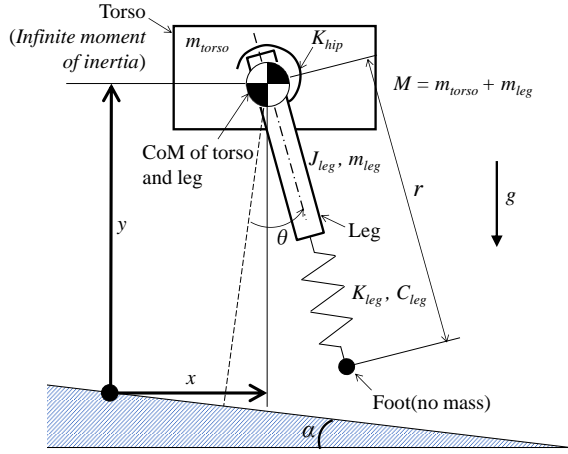


図1 Monopedal passive dynamic hopping physical model with infinite torso moment of inertia.

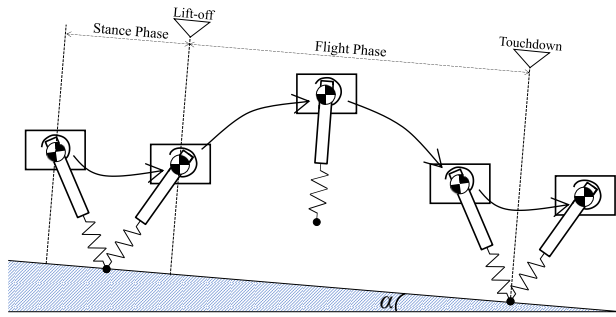


図2 Hopping motion for one period.

性は考慮されていないが、脚のダイナミクスの安定性を明らかにすることができる。

本モデルは、解析を簡単にするために、関連研究[15,16,17]で報告されている多くのものと同様に、胴体と脚の質量中心は股関節に位置している。また同様に下記の仮定を置く。

- (1) 運動は矢状面に限定される。
- (2) 衝突時に足先と地面の間に滑りは発生しない。
- (3) 足先と地面との衝突は非弾性衝突である。

3.2 運動方程式と衝突方程式

この1脚受動跳躍には立脚期と飛行期の2つの力学系が存在するため、各相で異なる運動方程式を導く必要がある。立脚期の運動方程式は(1)式で表される。

$$M_s(\theta_s)\ddot{\theta}_s + C_s(\theta_s, \dot{\theta}_s)\dot{\theta}_s + T_s(\theta_s, \dot{\theta}_s) + G_s(\theta_s) = \mathbf{0} \quad (1)$$

ここで、 $\theta_s = [\theta, r]^T$ は立脚期の位置ベクトルを示し、 θ および r はそれぞれ脚角度と脚長を表している。また、 $M_s(\theta_s)$ は慣性行列であり、 $C_s(\theta_s, \dot{\theta}_s)$ はコリオリ力と遠心力の行列、 $T_s(\theta_s, \dot{\theta}_s)$ は、バネの弾性力および減衰力のベクトル、 $G_s(\theta_s)$ は重力ベクトルである。

飛行期の運動方程式は(2)式で表される。

$$M_f(\theta_f)\ddot{\theta}_f + C_f(\theta_f, \dot{\theta}_f)\dot{\theta}_f + T_f(\theta_f, \dot{\theta}_f) + G_f(\theta_f) = \mathbf{0} \quad (2)$$

ここで、 $\theta_f = [\theta, x, y]^T$ は飛行期の位置ベクトルを示し、 x および y は股関節の水平方向の位置と鉛直方向の位置を表し

ている。

着地時においては衝突によって状態が離散的に変化する。この離散的な状態の変化は以下のようにして求められる。

着地の瞬間に脚軸方向に平行な運動量と接地点周りの角運動量が保存されることから、運動量保存則により以下の関係が導かれる。

$$Q^+ \dot{\theta}_{td}^+ = Q^- \dot{\theta}_{td}^- \quad (3)$$

ここで、 $\theta_{td}^+ = [\theta_{td}^+, r_{td}^+]^T$ 、 $\theta_{td}^- = [\theta_{td}^-, x_{td}^-, y_{td}^-]^T$ である。 θ_{td}^+ および θ_{td}^- は、それぞれ着地直後の状態ベクトルと着地直前の状態ベクトルである。行列 Q^+ と Q^- は、運動量保存則から求められる。(3)式より、着地直後の状態 $\dot{\theta}_{td}^+$ は下式の衝突方程式で記述できる。

$$\dot{\theta}_{td}^+ = (Q^+)^{-1} Q^- \dot{\theta}_{td}^- \quad (4)$$

衝突方程式の導出の詳細は、文献[19],[20]などを参照されたい。

3.3 漸近安定な不動点の探索

一般に、周期軌道の安定性は、対応するポアンカレ写像の不動点の安定性と等価であり、ポアンカレ写像の不動点が漸近安定であれば周期軌道も漸近安定(リミットサイクルは安定)である[21]。本研究では、受動的ロコモーションの先行研究[22]と同様に、ポアンカレ写像の不動点でのヤコビ行列の固有値から受動跳躍の安定性を評価する。

着地直後の状態を x^+ 、歩数を k とすると、 x^+_k から x^+_{k+1} へのポアンカレ写像 P は次式で表される。

$$x^+_{k+1} = P(x^+_k) \quad (5)$$

ここで $x^+ = [\theta_{td}^+, \theta_{td}^+, r_{td}^+]^T$ である。また、

$$x_f = P(x_f) \quad (6)$$

を満たす x_f は不動点と呼ばれる。本研究では、不動点をニュートン-ラフソン法によって探索した。ニュートンラフソン法による不動点探索の詳細は文献[20],[22]などを参照されたい。不動点の安定性は、力学系の流れを不動点まわりで線形近似して求められる次式を満たすヤコビ行列 J_f の固有値から評価できる。

$$\Delta x^+_{k+1} = J_f \Delta x^+_k \quad (7)$$

ヤコビ行列 J_f のすべての固有値の絶対値が1未満の場合、不動点は漸近安定、つまり安定なリミットサイクルが存在することになる。本研究では J_f は数値的に求めた。

図3は、数値シミュレーションで得られたヤコビ行列 J_f の固有値の絶対値の最大値 $| \lambda_{\max} |$ とそれに対応する物理パラメータ(無次元パラメータ)との関係を示す。本研究の1脚受動跳躍には、漸近安定な不動点を発現させる非常に多くの物理パラメータの組み合わせが存在することが確認された[23]。

3.4 段差に対する安定性

摂動に対する安定性の評価として、段差に対してダイナミクスがどのように変化するかを調べた。図4は、跳躍開始

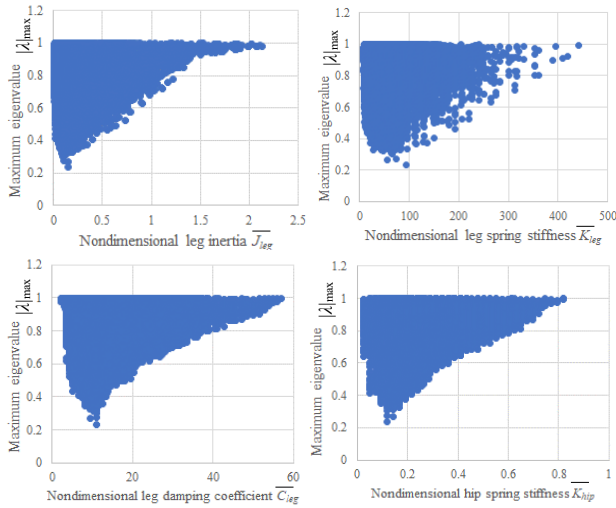


図3 Absolute values of the maximum eigenvalue of the Jacobian matrix $|\lambda|_{\max}$ and nondimensional body parameters.

後5歩目に高さ H の段差がある下り坂のスロープを示している。図5は、 H/r_0 が-44%（マイナスは下降段差）のときの着地直後における各状態を示している。段差を通過後、各状態は一時的に振動的に変化するもののその後不動点に収束した。

図6は、それぞれの段差高さ H において、段差通過後に不動点に収束するのに必要な跳躍数 N_{conv} を示している。予想される通り、ステップの高さ $|H/r_0|$ が大きいほど、不動点に収束するために必要な跳躍数 N_{conv} が増大し、また、段差 H がある値以上になると、瞬時に不安定になることがわかる。また図6は、段差に対して本モデルによる受動跳躍の安定性がどの程度高いかを示しているが、特に下降段差では、 $H/r_0 = -58\%$ までの段差に対しても漸近安定であることが見て取れる。

4. 受動跳躍実験

本章では、本研究室にて製作した跳躍機による受動跳躍実験について述べる。図7は胴体の姿勢(回転変位)が拘束された受動跳躍機がトレッドミル上を跳躍している様子を示す。本跳躍機は、胴体と1本の脚から構成される。胴体と脚との接続部(股関節)にはねじりばねが取り付けられており、脚には圧縮バネが配置されている。また胴体上部と水平シャフトをリニアブッシュを介して接続し、その水平シャフトの両端にそれぞれ鉛直シャフトをリニアブッシュを介して接続することによって、胴体の姿勢を拘束している(矢状面上の胴体の並進運動、および脚の運動は非拘束)。実験の結果、トレッドミル上において6km/hでの30分以上の連続跳躍が確認できた。また、図7のような直動の脚関節だけでなく回転関節においても長時間の連続跳躍が可能であることを確認している。次に、図8は跳躍機の胴体姿勢の拘束を外して階段状の段差を完全受動跳躍させた様子を示している。本実験により、最大で5段の段差を安定して跳躍する様子が確認された[24]。

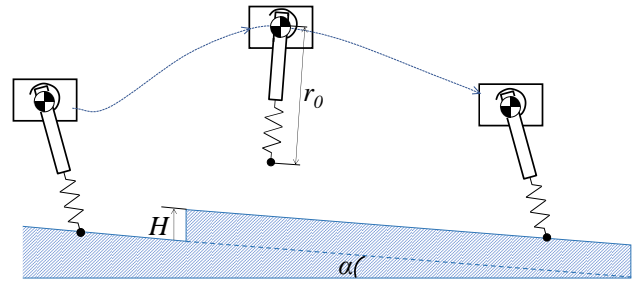
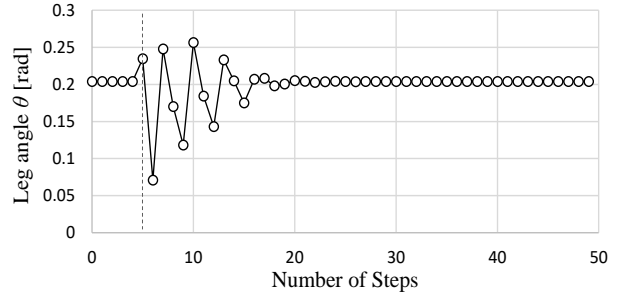
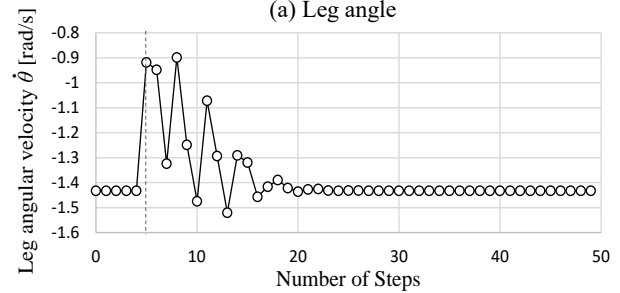


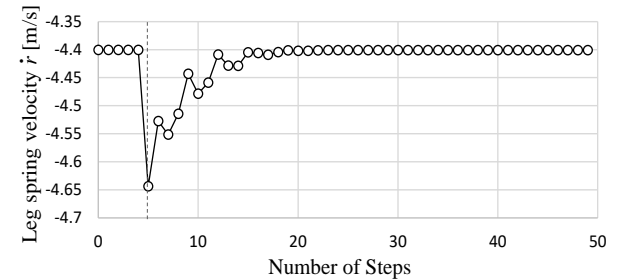
図4 Downward slope with level difference.



(a) Leg angle



(b) Leg angular velocity



(c) Leg axial velocity

図5 The states in a Poincaré section for each hop. On the fifth hop, a step with height $H/r_0 = -40\%$ emerges.

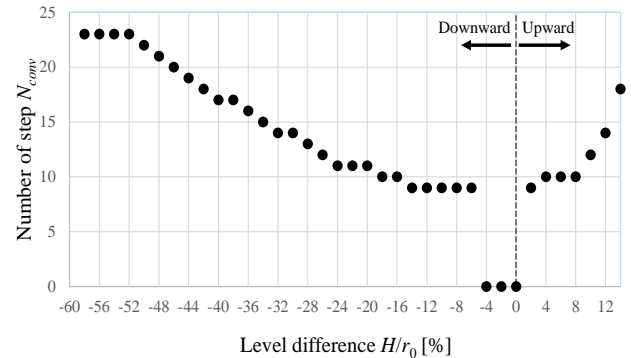


図6 The number of steps for each level difference when the state at the Poincaré section converges to a fixed point.

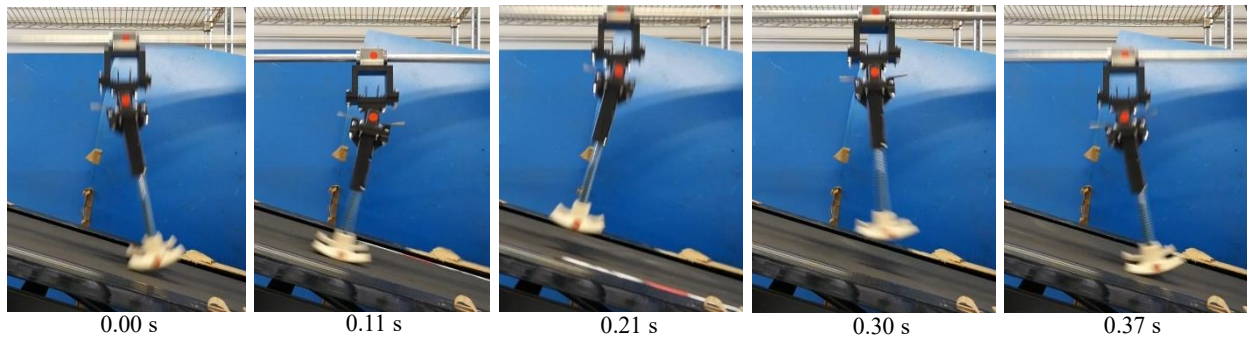


図7 Experiment result of passive dynamic hopping with constrained body rotation on a treadmill.

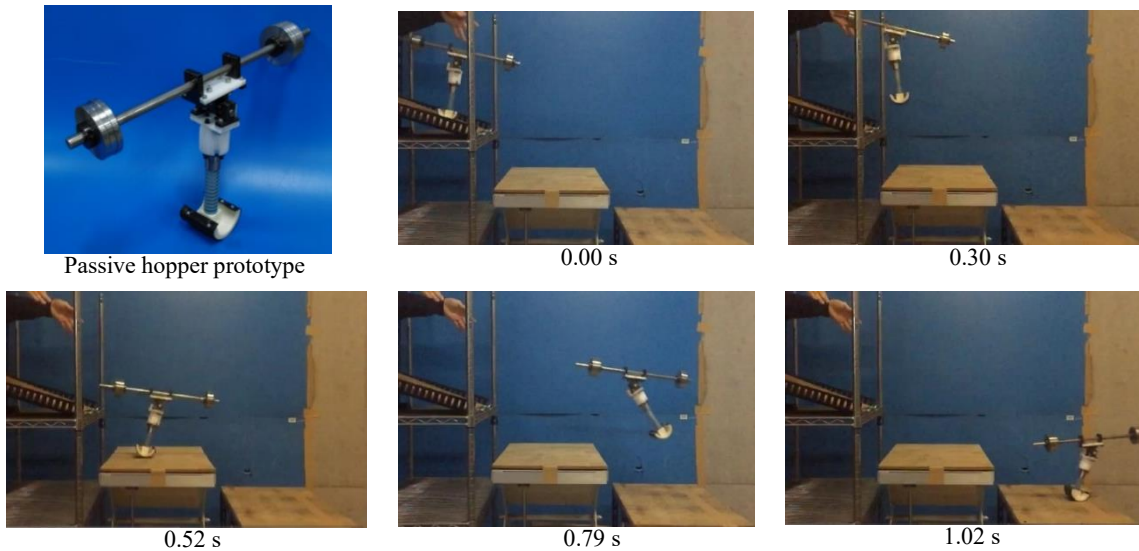


図8 Experiment result of passive dynamic hopping on steps.

5. おわりに

本稿では、本研究室で取り組んでいる受動跳躍の安定性解析および実機実験を中心に紹介した。現時点では、胴体の姿勢を拘束した受動跳躍では脚の安定なダイナミクスによって長時間の跳躍が可能な実機は実現できているものの、非拘束状態においては数歩の跳躍に留まっている。今後さらに解析と実験を進めて、より安定した受動跳躍が可能な跳躍機の実現を目指したい。最後に、本稿が受動的ロコモーションに興味を持たれている方の一助となれば幸いです。

参考文献

- [1] Dawson T. and Taylor C. Energetic cost of locomotion in kangaroos. *Nature* 246: 313–314, 1973.
- [2] Dawson T., Energetic cost of locomotion in Australian hopping mice. *Nature* 259: 305–307, 1976.
- [3] Baudinette R., Snyder G. and Frappell P., Energetic cost of locomotion in the tamar, wallaby. *American Journal of Physiology* 262:R771–R778, 1992.
- [4] Webster K. and Dawson T., Locomotion energetics and gait characteristics of a ratkangaroo, *Bettongia penicillata*, have some kangaroo-like features. *Journal of Comparative Physiology B* 173: 549–557, 2003.
- [5] R.M. Alexander: *Elastic Mechanisms in Animal movement*, Cambridge University Press, 1988.
- [6] Raibert, M., “*Legged Robots That Balance*,” MIT Press, 1986.
- [7] Raibert, M., and Tello, E., “*Legged Robots That Balance*,” *IEEE Expert*, 1(4), p. 89, 1986.
- [8] Raibert, M., Brown, H., and Chepponis, M., “*Experiments in Balance With a 3d One-Legged Hopping Machine*,” *Int. J. Rob. Res.*, 3(2), pp. 75–92, 1984,.
- [9] Geyer, H., Seyfarth, A., and Blickhan, R., “*Compliant Leg Behaviour Explains Basic Dynamics of Walking and Running*,” *Proc. R. Soc. B*, 273(1603), pp. 2861–2867, 2006.
- [10] Ghigliazza, R., Altendorfer, R., Holmes, P., and Koditschek, D., “*A Simply Stabilized Running Model*,” *SIAM J. Appl. Dyn. Syst.*, 2(2), pp. 187–218, 2003.
- [11] Zeglin, G., and Brown, B., “*Control of a Bow Leg Hopping Robot*,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Leuven, Belgium, May 16–20, Vol. 1, pp. 793–798, 1998.
- [12] Brown, B., and Zeglin, G., “*The Bow Leg Hopping Robot*,” *1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Leuven, Belgium, May 16–20, Vol. 1, pp. 781–786, 1998.
- [13] McGeer T. *Passive Dynamic Walking*, *The International Journal of Robotics Research*, 9(2), pp.62–82, 1990.
- [14] McGeer T. *Passive Bipedal Running*, *Proc. of the Royal Society of London, Series B.*, 240–1297, pp. 107–134, 1990.
- [15] Thompson C.M., Raibert M.H. *Passive dynamic running*. In: Hayward V, Khatib O. (eds) *Experimental Robotics I. Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 139, pp.74–83, 1990.

- [16] Hyon S, Emura T, and Ueta T. Delayed feedback control of one legged passive running robot. In: SICE 2004 Annual Conference. IEEE; 2004. p. 949-954.
- [17] Lei B, Wang P, Zha F, et al. Stability analysis of quasi-periodic hopping of a passive one-legged robot with compliant hip joint. In: 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE; 2014. p. 623-628.
- [18] Stiesberg G, Oijen T, Ruina A. Steinkamp's Toy Can Hop 100 Times But Can't Stand Up. J. Mechanisms and Robotics. 2017;9(1):011017 (13 pages).
- [19] Goswami A, Thuilot B, Espiau B. Compass like biped robot Part I: Stability and bifurcation of passive gaits. INRIA RR-2996, 1996.
- [20] Hyon S. and Emura T., "Energy-preserving control of a passive one-legged running robot", Advanced Robotics, Vol. 8, No. 4, pp.357-381, 2004.
- [21] Strogatz S. H., "Nonlinear Dynamics and Chaos", Westview Press, 2015
- [22] Poulakakis I, Papadopoulos E, M. Buehler. On the stable passive dynamics of quadrupedal running. In: 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE;2003. p. 1368-1373.
- [23] Nagase J, Yang S, Satoh T, Saga N. Asymptotically Stable Single-legged Passive Dynamic Hopping. IEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering. 2022;17(8):DOI:10.1002/tee.23615.
- [24] 永瀬 純也, 瀧本 健太, "一脚型受動走行機構の実験的研究", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 2P1-07b1, 2016.



永瀬純也 (Jun-ya Nagase)

2011年岡山大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。2006年住友重機械工業(株)。2010年関西学院大学理工学部契約助手。2012年龍谷大学理工学部機械システム工学科助教, 2015年同大学講師を経て2020年より同大学准教授。この間, 2019年サイモンフレーザー大学客員研究員。博士(工学)。ロボットの移動メカニズムおよびダイナミクスの研究に従事。日本機械学会, IEEE等会員。(日本ロボット学会正会員)