

柔軟関節を備えた一脚ロボットの 落下衝撃を吸収する受身動作の生成

Generation of Shock Absorbing Motion of a One-Legged Robot with a Flexible Joint

○アルタンゲレル オドプレブ*, 辻田哲平*, 関根知晴**, 安孫子聡子**
○Odpurev Altangerel*, Teppei Tsujita*, Tomoharu Sekine**, Satoko Abiko**

*防衛大学校, **芝浦工業大学

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

キーワード : パラシュート着地動作 (parachute landing fall motion), 最適受け身動作 (optimal shock absorbing motion), 柔軟関節 (series elastic actuators), 脚型ロボット (Legged robots)

連絡先 : 〒 239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校 システム工学群 機械工学科
辻田 哲平, Tel.: (046)841-3810, E-mail: t.tsujita@ieee.org

1. 緒言

近年, 災害現場などで人の代わりに危険な作業をするロボットが, 注目されるようになってきている. 災害現場で活動するためには, いかに災害現場までロボットを搬入するかといった問題が生じる. そこで, 路面状況の影響を受けないロボットの投入方法として, 本研究では Fig. 1 に示すように, パラシュート降下によるヒューマノイドロボットの迅速な投入を目指す.

一般に, 着地時には二階から飛び降りた際と同等の衝撃がかかるとされている¹⁾. 災害対応ロボットとして有力視されているヒューマノイドロボットは一般に減速機や, センサや電子機器などの精密機器を搭載していることから, 衝撃に対して弱い. そこで, ヒューマノイドロボットのパラシュート降下時の着地衝撃を低減する方法についていくつかの研究がなされている.

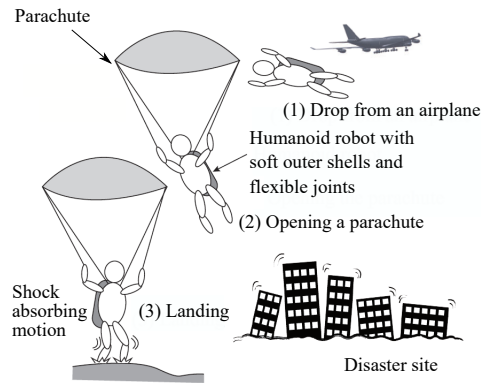


Fig. 1 ヒューマノイドロボットのパラシュート着地の様子

例えば, Tsujita らはパラシュート着地動作を試行錯誤的に作成し, 小型一脚ロボットの落下実験により動作の有用性を示した²⁾. また, Liu らは, DDP (Differential Dynamic Programming) を用いて着地後の転倒を防止する方法についての議論を行っているが, 着地, 転倒, 静止の一連

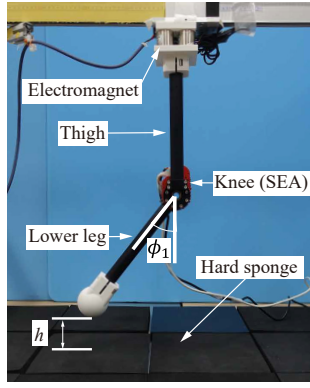


Fig. 2 柔軟関節を有した一脚ロボットの外観

の流れについては議論していない³⁾。関根らはパラシュート着地動作生成のために、柔軟関節を有する一脚ロボットの落下実験および動力学シミュレーションを行い妥当性の検証を行ったが、動力学計算にかかる時間に課題があり、最適動作生成には至っていない⁴⁾。そこで本研究では、平面内の運動に限定して動力学モデルを立式し、最適なパラシュート着地動作の生成を試みる。

2. 柔軟関節ロボットのモデル

2.1 2リンク1柔軟関節ロボット⁴⁾

Fig. 2に、本稿で対象とする人の脚部を模した一脚ロボットの外観を示す。膝部には、SEA (Series Elastic Actuator)⁵⁾としてHEBI Robotics社製X-シリーズアクチュエータX8-9を有している。膝部の角度 ϕ_1 は、大腿部と下腿部が一直線に並んだ状態を 0° とする。本ロボットの各リンクの長さは0.3 mで、全質量は1.6 kgである。Table 3に、動力学シミュレーションで使用するパラメータを示す。

2.2 運動方程式

本研究で対象とする一脚ロボットやヒューマノイドロボットは環境に固定されていないマニピュレータであり、宇宙マニピュレータの運動方程式⁶⁾をもとに、重力項を追加することで動

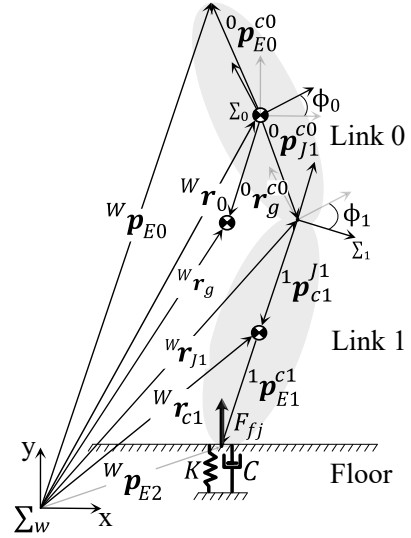


Fig. 3 2リンク1関節ロボットの動力学モデル

Table 1 動力学シミュレーションのパラメータ

m_0 [kg]	m_1 [kg]	I_0 [kg · m ²]	I_1 [kg · m ²]
0.806	0.806	6.09×10^{-3}	6.09×10^{-3}
τ_{max} [Nm]	$\dot{r}_{0,x}$ [m/s]		
20	0.63		

力学計算を行うことができる。Fig. 3に2リンク1関節モデルで表現される一脚ロボットの動力学モデルの模式図を示す。ここで、 w_o を慣性座標系 Σ_w でのベクトル、 i_o をリンク座標系 Σ_i ($i=1$ or 2)でのベクトル、 ${}^o_{o,x}$ および ${}^o_{o,y}$ をベクトル o_o の x 、 y 軸方向の要素とする。2次元平面での運動方程式は、リンク0の位置・姿勢 $[{}^w r_{0,x} \ {}^w r_{0,y} \ \phi_0]^T$ および関節変数 ϕ_1 を一般化座標 \mathbf{q} として以下のように示される。

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{b1}^T \mathbf{F}_{f1} \\ \tau_{SEA} \end{bmatrix} + \sum_{j=2}^3 \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{bj}^T \\ \mathbf{J}_{mj}^T \end{bmatrix} \mathbf{F}_{fj} \quad (1)$$

式(1)において、左辺第1~3項は、それぞれ、慣性力、遠心力・コリオリ力、重力を表している。また、右辺はアクチュエータおよび外力 \mathbf{F}_{fj} による一般化力を表している。 j は接点番号を表しており、リンク0上部($j=0$)、リンク1原点($j=1$)、リンク1先端($j=2$)に定義している。 \mathbf{J}_{bj} はリンク0の運動に関する、 \mathbf{J}_{mj} は関節運動に関する j 点におけるヤコビ行列をそれぞれ表している。この運動方程式をMathworks

社製数値計算ソフトウェア MATLAB 上で実装した。

2.3 柔軟関節モデル

K_{SEA} と C_{SEA} はそれぞれ SEA の弾性要素の弾性係数と粘性係数とし、SEA の出力トルク τ_{SEA} を式 (2) で表すこととする。

$$\tau_{SEA} = \begin{cases} \tau'_{SEA} & \text{if } |\tau'_{SEA}| < \tau_{max} \\ \text{sign}(\tau'_{SEA})\tau_{max} & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

$$\tau'_{SEA} \equiv K_{SEA}(\phi_{motor} - \phi_1) + C_{SEA}(\dot{\phi}_{motor} - \dot{\phi}_1)$$

ここで、 τ_{max} はアクチュエータの最大トルク、 ϕ_{motor} は SEA 内部のモータの出力軸角度である。この τ_{SEA} を式 (1) に代入することで、リンクの角加速度 $\ddot{\phi}_1$ が求まり、これを数値積分することで、各時刻におけるリンク 1 の角度 ϕ_1 が求まる。一方で、モータの出力トルク τ_{motor} は、式 (3) で表す。

$$\tau_{motor} = K_p(\phi_{ref} - \phi_1) + K_d(\dot{\phi}_{ref} - \dot{\phi}_1) \quad (3)$$

ここで、 ϕ_{ref} は、SEA の出力軸の目標関節角度（リンク 1 の目標角度）を表している。式 (2) と式 (3) から得られるトルクを用いて、モータの慣性モーメントを I_{motor} とすると、以下の運動方程式からモータの加速度 $\ddot{\phi}_{motor}$ が求まる。

$$\ddot{\phi}_{motor} = \frac{\tau_{motor} - \tau_{SEA}}{I_{motor}} \quad (4)$$

この $\ddot{\phi}_{motor}$ を数値積分することで、モータの角度 ϕ_{motor} が求まる。

2.4 床反力モデル

床反力は、式 (1) において、外力 F_{fj} として与える。床の弾性係数を K_f 、垂直方向の粘性係数を $C_{f,y}$ 、水平方向の粘性係数を $C_{f,x}$ とし、次式で計算する。

$$F_{fj,x} = \begin{cases} -C_{f,x} {}^w \dot{p}_{Ej,x} & \text{if } {}^w p_{Ej,y} < 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$F_{fj,y} = \begin{cases} F & \text{if } {}^w p_{Ej,y} < 0 \cap F > 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$F \equiv -K_f {}^w p_{Ej,y} - C_{f,y} {}^w \dot{p}_{Ej,y}$$

ここで、 ${}^w p_{Ej}$ はワールド座標系における j 点の位置ベクトルである。

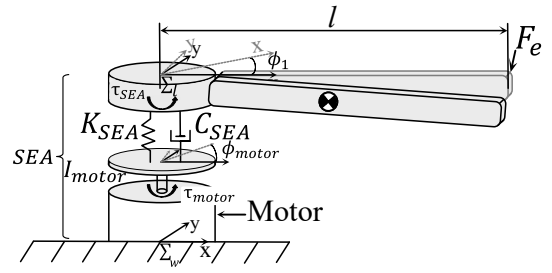


Fig. 4 柔軟関節を有する 1 リンクマニピュレータ

3. 関節モデルのパラメータ同定

本章では関根らが行った HEBI Robotics 社製の X-シリーズアクチュエータの X8-9 に対する衝撃印加実験の結果⁴⁾をもとに、第 2.3 節で示したモデルの定数 K_p 、 K_d 、 K_{SEA} 、 C_{SEA} および I_{motor} を同定する。Fig. 4 に示すように、SEA のベースが地面に固定され、出力軸にリンクが接続されている 1 リンクマニピュレータモデルの水平面内の運動のみを取り扱うため、重量項を無視することができるため、運動方程式は式 (5) のようになる。

$$M(\phi_1)\ddot{\phi}_1 + C(\phi_1, \dot{\phi}_1) = \tau_{SEA} + \begin{bmatrix} -l \sin \phi_1 \\ l \cos \phi_1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 \\ F_e \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 ϕ_1 、 M 、 C および l は、それぞれ、リンクの角度、慣性行列、コリオリ項、リンク長さを表す。また、 F_e には実験で得られた y 軸方向の外力を入力し、関節角度指令 ϕ_{ref} は 0 としたうえで、式 (2) から τ_{SEA} を計算する。この外力を入力した際の関節角度軌道が数値シミュレーションと実験で一致するように、 K_p 、 K_d 、 K_{SEA} 、 C_{SEA} および I_{motor} を決定変数 \underline{U} とした最適化問題を以下の通り定式化する。

$$\min_{\underline{U}} E(\underline{U}) = \sum_{m=1}^8 \sum_{n=0}^{N(m)} (\phi_{1,m}^{exp}(n) - \phi_{1,m}^{sim}(n))^2$$

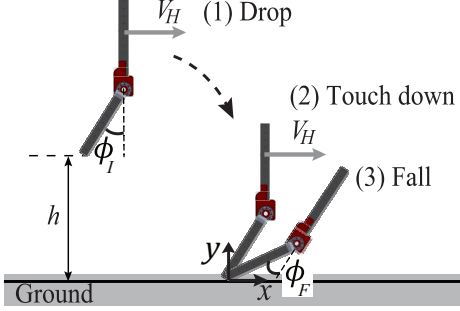
$$\text{sub. to } \underline{U} \leq \underline{U}$$

$$\underline{U} \equiv [K_p \ K_d \ K_{SEA} \ C_{SEA} \ I_{motor}]^T$$

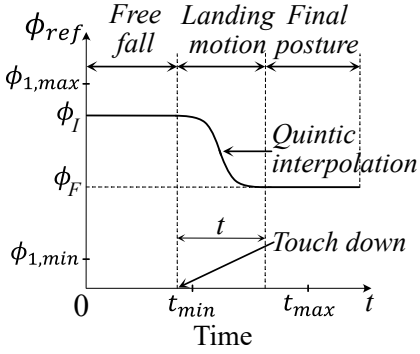
ここで、 m は実験回数（実験は 8 条件で行われた⁴⁾）、 n はステップ数、 $N(m)$ は実験 m の関節角度履歴の総ステップ数、 $\phi_{1,m}^{exp}$ は実験で得られた関節角度、 $\phi_{1,m}^{sim}$ はシミュレーションで得られた関節角度を表している。また、 \underline{U} は決定

Table 2 パラメータの同定結果

K_p Nm/rad	K_d Nm/(rad/s)	K_{SEA} N·m/rad
50	1	65
C_{SEA} N·m/(rad/s)	I_{motor} kg·m ²	
1.6	0.085	



(a) 落下条件



(b) 受け身動作の生成手法

Fig. 5 最適受け身動作生成

変数 U の下限値を表し, 0 以上になるように設定した. 得られた同定結果を Table 2 に示す.

4. 最適受け身動作の生成

Fig. 5 (a) に示すように, 一脚ロボットが高さ h で水平方向速度 V_H で投げられ, 自由落下する状況を考える. 本研究では, 受け身動作を以下の流れに沿って行うこととする.

- 1) 自由落下中は初期関節角度 ϕ_I を保つ.
- 2) 着地衝撃を検知したら, 最終関節角度 ϕ_F に t 秒で遷移するように 5 次補間で目標関節角度を与え受け身動作を行う (Fig. 5 (b)).
- 3) t 秒経過後は, 最終関節角度 ϕ_F を保つ.

Table 3 決定変数の値域

$\phi_{1,\min}$ [°]	$\phi_{1,\max}$ [°]	t_{\min} [s]	t_{\max} [s]
-90	0	0.1	1

こうすることで, 受け身動作を $\mathbf{x} \equiv [\phi_I \ \phi_F \ t]^T$ の三つの変数で表現することができる.

次に, 第 2 章で示した動力学モデルに基づいて, 動力学シミュレーションと最適化アルゴリズムを組み合わせ, 大腿部にかかる加速度を最小化する動作を生成する. 本問題を上述の \mathbf{x} を決定変数として以下の通り定式化する.

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{x}) &= \max \|\mathbf{r}_0\| \\ \text{subject to } &\phi_{1,\min} \leq \phi_I \leq \phi_{1,\max} \\ &\phi_{1,\min} \leq \phi_F \leq \phi_{1,\max} \\ &t_{\min} \leq t \leq t_{\max} \end{aligned} \quad (6)$$

目的関数として, 動力学シミュレーションによって得られる大腿部にかかる加速度 \mathbf{r}_0 の最大値とし, これを最小化するように決定変数を変化させることとした. $\phi_{1,\min}$ と $\phi_{1,\max}$ はそれぞれ関節の稼働範囲の下限と上限を表している. また, t_{\min} は t_{\max} は受け身動作の遷移時間の下限と上限を表している.

5. 結果と考察

Table 3 に示すように決定変数の値域を設定し, Fig. 5 (a) における水平方向速度を V_H を 0.63 m/s, 高さ h は 0.4 m とした条件で, 式 (6) の非線形最小化問題を解いた. 本最小化問題のソルバーとして, MATLAB の Global Optimization Toolbox/Optimization Toolbox に含まれる SQP (Sequential Quadratic Programming), Pattern Search, GA (Genetic Algorithm) を比較した. その結果, GA が最も目的関数を小さくすることに成功し, 計算時間は 890 s (CPU: AMD 社製 Ryzen Threadripper PRO 3975W, メモリ 128GB) であった.

この GA によって生成した受け身動作を行った場合の様子を Fig. 6 (a) に, 関節角度を一定 ($\phi_{ref} = 45^\circ$) として落下させた場合の様子を Fig. 6 (b) に示す. また, Fig. 7 にリンク 0 (大腿部) の重心の x 軸方向加速度 $\ddot{r}_{0,x}$ と y 軸方向加速度 $\ddot{r}_{0,y}$ を示す. なお, $t = 0$ s を落下開始の瞬間としている.

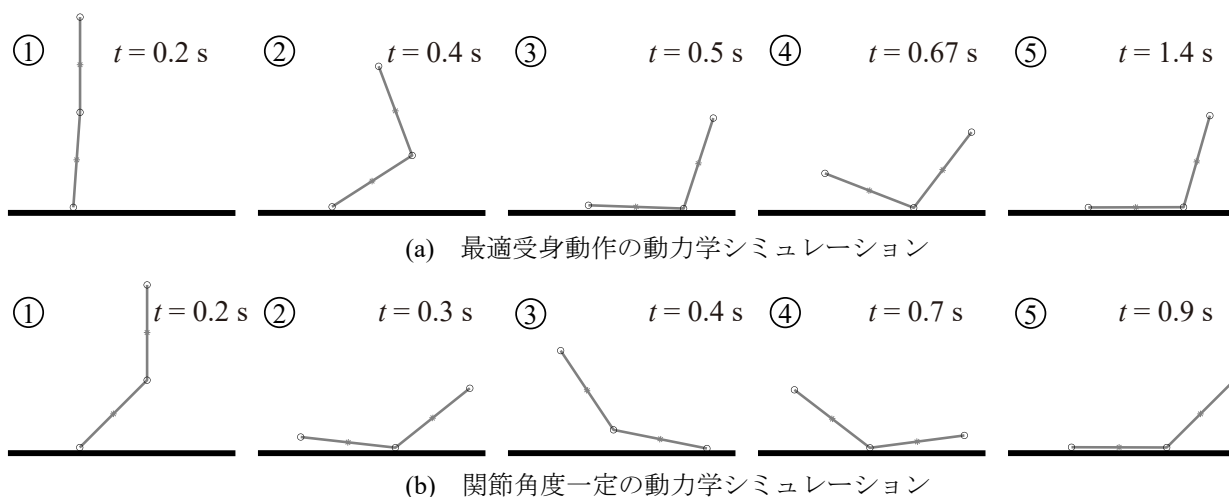
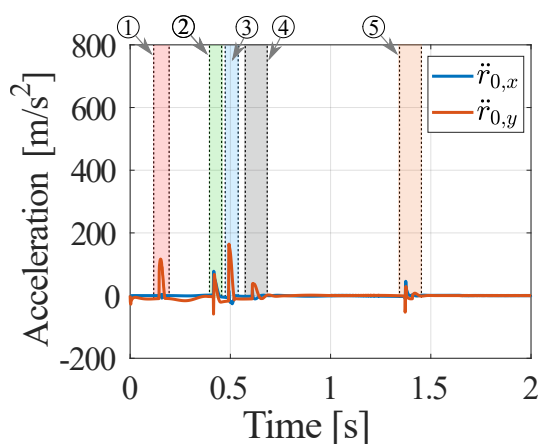
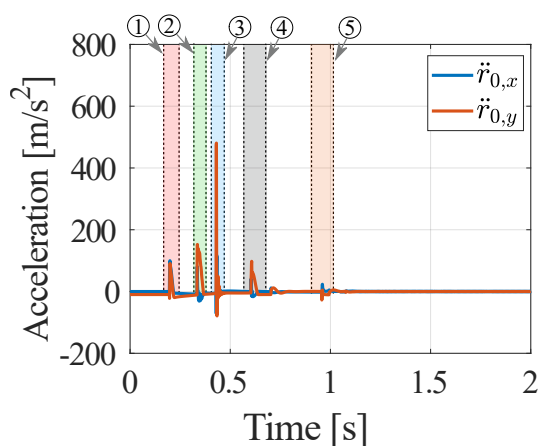


Fig. 6 一脚ロボットの角度一定と受け身動作の比較



(a) 最適受身動作



(b) 関節角度一定 ($\phi_{ref} = 45^\circ$)

Fig. 7 リンク0の重心の加速度

床面の接触後に加速度のピークが観察された区間を以下のように①から⑤までの番号で動作と関連づけて表現する。また、Fig. 7(a)および(b)の動力学シミュレーション結果において

は、これらの番号に対応する状況が分かるように、各時刻の横に番号を示している。

最適受身動作においては、次のような衝突が生じた。

- ① 床面と足先（リンク1先端）の最初の衝突
- ② ①の勢いで跳ね返り、床面と足先が再度衝突
- ③ 床と膝（リンク1原点）の衝突
- ④ ③の勢いで膝が跳ね返り再度床と膝が衝突
- ⑤ 最終的な静止状態になるために足先が床面と衝突

一方で、関節角度一定の落下シミュレーションにおいては、次のような衝突が生じた。

- ① 床面と足先の最初の衝突
- ② 床と膝の衝突
- ③ 床と大腿部上部（リンク0上部）の衝突
- ④ 床と膝の衝突
- ⑤ 最終的な静止状態になるために足先が床面と衝突

最適受身動作および関節角度一定の両方の場合において、③でもっとも高い加速度が観測されている。最適受身動作においては、 181 m/s^2 で、関節角度一定時では 466 m/s^2 であった。従って、61%加速度を低減できた。加速度を低減できた要因として、関節角度一定時では、Fig.6(b)③に示すように大腿部への大きな加速度を引き起こす大腿部上部と床面の衝突が発生しているが、最適受身動作においては、受身動作をすることによって足先と膝のみが床と接触し、大腿部上部が衝突していないためと考えられる。

6. 結言

本論文では、平面運動に限定して動力学モデルを立式し、最適なパラシュート着地動作の生成を行った。関節角度を一定にして落下した場合と比較して、最適受身動作を行うことによって大腿部の重心の加速度を 61 % 低減することができた。今後、ロボットの多自由度化、柔軟外装の考慮を行い、3次元空間での最適動作生成と実機実験での検証を行う。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP19H02119 および競輪 2022M-268 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 日本パラグライダー協会: パラグライダー最新テクニックブック, イカロス出版 (2010)
- 2) T. Tsujita, O. Altangerel, S. Abiko, A. Konno: Analysis of drop test using a one-legged robot toward parachute landing by a humanoid robot, IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, 221/226 (2017)
- 3) D. Liu, Y. Liu, Y. Xing, S. Ghosh, V. Kapila: DDP-based parachute landing optimization for a humanoid, IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, 122/128 (2020)
- 4) 関根知晴, 安孫子聡子, 辻田哲平: 落下衝撃緩和動作生成のための柔軟関節を有する一脚ロボットの動力学シミュレーション, 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, 2A2-K12 (2022)
- 5) G.A. Pratt, M. Matthew: Series Elastic Actuators, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 399/406 (1995)
- 6) 吉田和哉: ダイナミクス計算のための MATLAB ツールボックス, 計測と制御, **38**-2, 138/143 (1999)