

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：82723

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12113

研究課題名(和文) ヒューマノイドロボットによるパラシュート着地の実現

研究課題名(英文) Realization of parachute landing by humanoid robot

研究代表者

辻田 哲平(Tsujita, Teppei)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・システム工学群・准教授)

研究者番号：40554473

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：災害現場でのタスクの実行方法については積極的に議論がなされているが、ロボットをいかにして災害現場に搬送するかといった重要な問題についてはほとんど議論がなされていない。そこで、ロボットを災害現場へ運ぶ方法の1つとして、飛行機からパラシュートを備えたヒューマノイドロボットを投下することを提案する。なかでも本研究では、ロボットの損傷防止のために着陸時の衝撃を全身運動で吸収する方法の確立を目指す。研究の初期段階として、小型の片脚ロボットを用いた落下試験を実施した。これらの実験から得られた観点から小型ロボットのパラシュート着地動作を試行錯誤的に設計し、衝撃による加速度を40%に低減することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Although how to perform tasks at disaster sites has been actively discussed, there is little debate on important issues such as how to deliver robots to disaster sites. We propose to drop a humanoid robot with a parachute from an airplane as one of the methods of delivering robots. In this research, we aim to establish a method to absorb the shock at the time of landing by whole body motion for preventing the damage to the robot. As an early stage of this research, drop tests using a small one-legged robot were conducted. From the viewpoint obtained by these experiments, we designed a parachute landing motion for the small robot heuristically and succeeded in reducing the impact acceleration to 40%.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ヒューマノイドロボット 受け身動作 衝撃

1. 研究開始当初の背景

人間の生活空間で発生した災害に対応するには、人間の形状に似たヒューマノイドロボットが適しており開発が盛んに行われている。しかし、災害現場で行う作業について議論の議論は多くなされているものの、災害対応ロボットを災害現場に送り届ける方法については議論が少ない。例えば、DARPA ROBOTICS CHALLENGE ではロボットが自動車を運転し被災地に到達することを想定しているが、震災後のように瓦礫等で地上からは到着できないケースも想定される。そこで図 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ことを提案する。パラシュート着陸時の衝撃を緩和する手段として、ロケットエンジンの噴射やエアバッグが広く用いられているが、着陸装置の大型化に伴う輸送効率の低下が問題となる。また、ロケットエンジンに関しては引火性物体を扱う困難さ、エアバッグに関しては接地後のバウンドによりピンポイントに狭小地に着陸させることが困難といった問題もある。

パラシュート降下はヘリコプタによる懸垂降下と比較して、航空機が現場に接近する必要がなく、原子炉災害や大規模火災等にも対応可能である。また固定翼機を利用可能であるため、一度に多くのロボットを投入可能、標高の高い地域でも活動可能といった利点もある。そこで本研究では、人間のパラシュート降下動作にならう、専用の着陸装置を用いない PLF (Parachute Landing Falls, パラシュート着陸時の受け身)[1]のようなロボットの全身を活用した受け身動作による衝撃吸収方法について議論する。

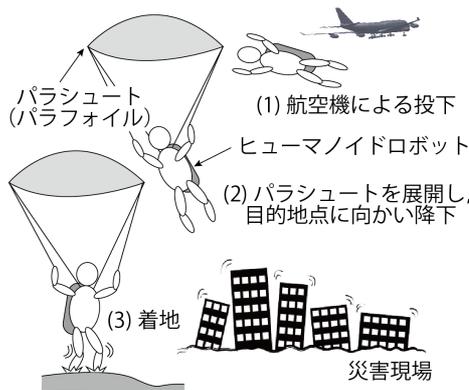


図 1 パラシュート降下

2. 研究の目的

パラシュート降下において最も困難な課題は、着地時の衝撃を吸収する方法である。パラシュートやパラfoil(翼型のパラシュート, パラグライダー)による投下を想定した場合、図 1 の手順(1),(2)に関しては多く研究がなされており、パラfoil自動送付システム SPADES [2]などが市販されるまでに

至っている。一方、(3)の着地に関してはその衝撃力の大きさから精密機器の故障が頻繁にあり、研究の必要性が高い。Whitting らによると、平均身長 1.76 [m], 平均体重 83 [kg] の男女 20 名が、降下角度を 4° , 水平方向降速度を 2.3 [m/s], 鉛直方向降速度を 4.6 [m/s]として着地した場合、着地衝撃は約 11 [kN]にも及ぶことが示されている[3]。この着地時の衝撃緩和動作の 1 つとして、5 接地転倒と呼ばれる着地法がある[1]。全身を運動連鎖させることで衝撃を緩和することが可能な着地方法である。本研究では、5 接地転倒のようにロボットの全身を使い衝撃を緩和し損傷を防ぐ手法の実現を目指す。

従来、ヒューマノイドロボットの衝撃吸収動作は主に転倒による衝撃などを想定しており、膝をつく[4], 手などをつく[5]といった動作により衝撃緩和がなされてきた。これらは、地面とロボットの間を剛体接触として取り扱っているが、本研究では、より衝撃力の強い高速衝突時において、柔軟な外装や柔軟関節を有する多関節ロボットの各関節を運動連鎖させ、ロボットの柔軟性を生かし衝撃を回避する手法の提案を目指す。

3. 研究の方法

小型 1 脚ロボットを製作し、人間のパラシュート降下を模した状況で落下試験を行い、衝撃力を緩和する最適着地動作生成に向けた初期検討を行った。5 接地転倒動作においては、両脚を揃え、腕部は体幹部に引き寄せて捻り動作を行う[1]。そこで、可能な限り自由度を低減した、小型 1 脚ロボットを製作して落下試験を行った。

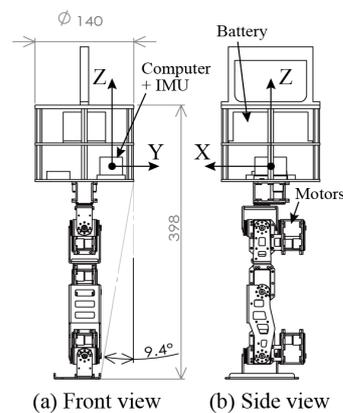


図 2 小型 1 脚ロボットの外形

図 2 に開発した 1 脚ロボットの外形を、図 3 に脚部の自由度配置を、図 4 に外観を示す。身長 398 [mm], 重量 1.3 [kg] であり、体幹部に制御用計算機とバッテリーを有する。制御用計算機として Intel 社製 Edison を搭載しており、この計算機に接続された STMicroelectronics 社製 IMU(Inertial Measurement Unit) LSM9DS0 で計測された加

速度情報を 500 [Hz] で取得する．脚部の構造は，ROBOTIS-OP2 [6] の右脚と同じ構造をしており，モータには ROBOTIS 社製スマートアクチュエータ Dynamixel MX-28 を用いた．

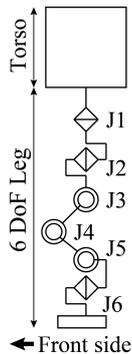


図 3 自由度



図 4 外観

着地時の衝撃力は極めて大きく，また高い周波数の現象であることが予想される．このため，ロボットの運動制御のみならず，柔軟外装や柔軟関節をロボットに付与することで機械的な柔軟性を持たせ，これを活用した運動生成を行うことで，従来手法では不可能であった大きな衝撃を吸収可能な動作生成手法の提案を目指す．これには，柔軟要素の開発も必要となってくるが，動作生成手法の研究と平行して行うために，図 5 に示すように剛なロボットを，柔軟な地面に落下させることで問題を簡略化する．

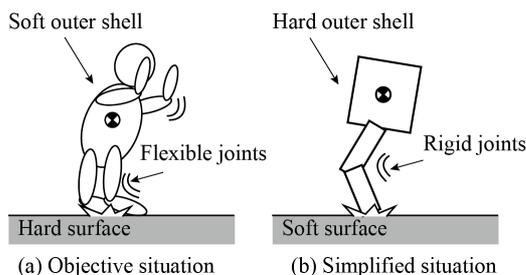


図 5 問題の簡略化

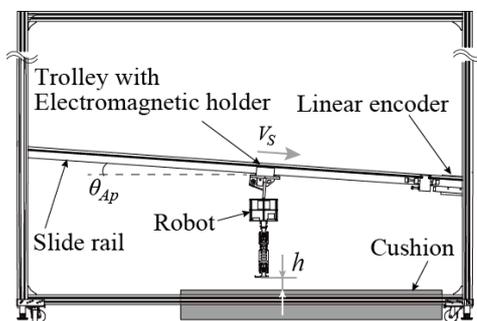


図 6 落下試験装置

小型 1 脚ロボットを落試験装置 (図 6) で緩衝材の上に落下させる．図 6 において，ロボットは紙面に対して鉛直方向に向いた状態

でつり下げられており，ロボットの左方向 (図 2 (a) に示した Y 軸方向) に落下していく．スライダレールにより自由に直線運動が可能なトロリーに電磁石によりロボットを取り付け，降下角度 θ_{Ap} でロボットを落下させることができる．衝撃緩衝材 (光社製低反発ウレタンフォーム KTHU-3030) の表面から脚底の底面までの高さが h となったときに，ロボットをトロリーから切り離し，自由落下させる．切り離し時の降下速度 V_S は，スライダレールの移動開始地点を変化させることで，所望の降下速度を得ることができる．

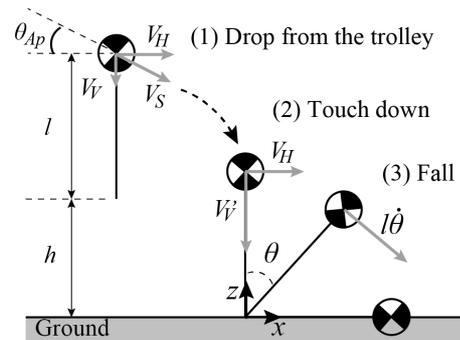


図 7 パラシュート着地の簡略化モデル

Whitting らによる人間のパラシュート降下と等しい降下速度を小型ロボットに与えた場合，その重心位置の低さから，人間が転倒する時間と比較して短い時間となり，衝撃緩和動作を行う時間的余裕がない．そこで，図 7 に示すモデルにより，人間の転倒時間 T を求め，小型ロボットでも転倒時間が等しくなる降下速度 V_S を求める．図 7 に示したモデルでは人間もしくはロボットを長さ l の倒立振り子としてモデル化し，降下角度 θ_{Ap} ，水平方向降下速度 V_H ，鉛直方向降下速度 V_V' で地面と衝突した後，直立の姿勢のまま転倒する場合を考える．ここで，次の仮定をおき，転倒に要する時間 T を求める

1. 鉛直方向速度 V_V' は着地後に 0 となる (完全塑性衝突)．
2. 水平方向の速度 V_H は着地前と変わらない．
3. 着地後は着地点を中心として回転する．

上記の仮定より，着地時を時刻 $t=0$ として，着地時と時刻 t におけるエネルギー保存則より，図 7 に示した転倒角度 $\theta(t)$ に関する微分方程式が求まる．

$$\frac{1}{2} m V_H^2 + mgl = \frac{1}{2} m (l\dot{\theta})^2 + mgl \cos \theta \quad (1)$$

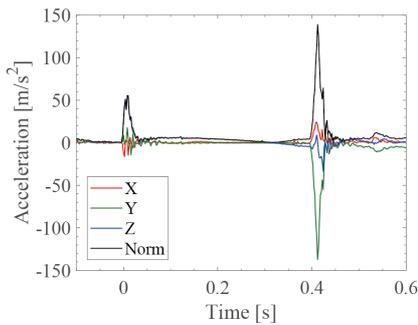
ここで， m は質量， g は重力加速度である．(1) 式を (t) について解き，転倒角度が $(T) = \pi/2$ [rad] となるときの転倒時間 T を求めると次式で表される．

$$T = \frac{2l}{V_H} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4gl}{V_H^2} \sin^2 \Theta}} d\Theta \quad (2)$$

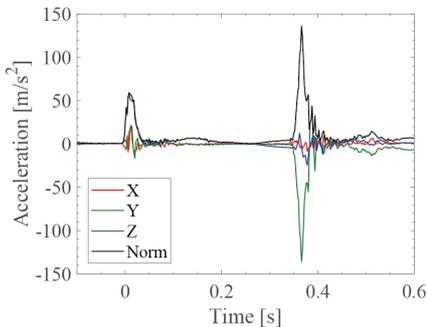
ここで、 $\Theta = \pi/2$ と置いた．人間のパラシュート降下時の水平速度 $V_H=2.3$ [m/s]，重力加速度 $g=9.8$ [m/s²]，人間の重心高さ $l=1$ [m] を(2) 式に代入すると，転倒時間 T は 0.49 [s] となる．ここで高さ l は，人間の重心位置は身長約 55% [7] の位置にあるとして，文献[3] の被験者の平均身長から求めた．次に，小型 1 脚ロボットの転倒時間が 0.49 [s] となる降下速度 V_S を求める．小型 1 脚ロボットの重心高さは 0.23 [m] であるため，(2) 式から小型ロボットの水平速度 V_H を数値的に求め，降下角度 $\theta_{AP} = 4$ [°] より降下速度 V_S を計算すると 0.2 [m/s] となる．本結果を用いて，次節以降の実験では $V_S = 0.2$ [m/s]，降下角度 $\theta_{AP} = 4$ [°] として 1 脚ロボットを試験装置により落下させた．

4. 研究成果

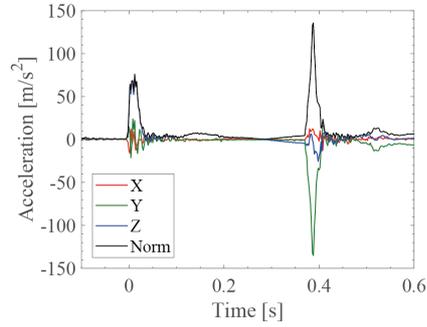
Whitting らの実験では，0.32, 0.74, 1.33 [m] と落下高さを変えて床反力の変化を観察している．本研究でもこれに習い，図 2 に示した直立の姿勢のまま $h=50, 100, 150$ [mm] の高さから $V_S = 0.2$ [m/s]，降下角度 $\theta_{AP} = 4$ [°] で落下させ，体幹部に搭載された IMU によって着地によって生じる加速度を計測した結果を図 8 に示す．



(a) $h = 50$ [mm] ($V_V' = 1.0$ [m/s])



(b) $h = 100$ [mm] ($V_V' = 1.4$ [m/s])



(c) $h = 150$ [mm] ($V_V' = 1.7$ [m/s])

図 8 加速度と落下速度の関係

ここで，X-Y-Z の各軸の方向の定義は図 2 (a) に示した通りであり，X 軸方向加速度 a_x を赤線，Y 軸方向加速度 a_y を緑線，Z 軸方向加速度 a_z を青線で示した．黒線で示した値は，加速度のノルムを示している．なお，一回目の加速度の増加開始時点時刻 0 [s] として加速度の時間履歴をプロットしている．

図 8 (a) ~ (c) のいずれの場合においても，2 回のピークが観測されている．1 回目のピークは，足底が床面（緩衝材）に接地した際の加速度変化であるため Z 軸正方向に加速度が観測されている．2 回目のピークは，着地後に転倒し体幹部左側面が Y 軸方向に床面と衝突するため，Y 軸負方向に加速度が生じている．1 回目のピークと 2 回目のピーク間の時間が，設計した転倒時間に相当する．(a) ~ (c) のいずれの場合においても，おおむね 0.4 [s] 程度となっている．設計した転倒時間は 0.48 [s] であったため，0.08 秒ほど転倒時間が短い結果となったが，その誤差は小さいものと考えられる．

エネルギー保存則より，各落下高さ $h=50, 100, 150$ [mm] における鉛直方向着地速度 V_V' を計算するとそれぞれ 1.0, 1.4, 1.7 [m/s] となる．この着地速度と加速度のノルムの関係に着目すると，1 回目のピークに関しては速度に比例して増大していることが判る．一方，2 回目のピークは V_V' に依らず約 140 [m/s²] で一定である．これは，第 3 章で示した仮定が妥当であり，2 回目の衝突直前の速度は降下時の鉛直方向速度に依らず，水平方向速度（本実験では一定値 0.2 [m/s]）にのみ依存しているため，一定であると考えられる．

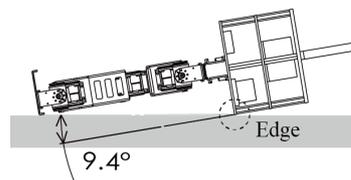


図 9 転倒時の様子

2 回目の衝突直前の速度は、重力による影響を微小として無視すると、 V_H に等しく本実験では 0.2 [m/s] である。従って、1 回目の衝突直前の速度 1.0, 1.4, 1.7 [m/s] に比較して、低速であるにもかかわらず、加速度は大きい値となっている。これは、1 回目の床面との接触が足底で面接触しているのに対して、図 9 に示した様に、2 回目の接触は体幹部の角で接触しているため、大きな接触力が発生し、結果として大きな加速度が生じたものとする。従って、接触の様相を変化させることで、この 2 回目の加速度を低減できると考えた。そこで、ロボットの角が 1 点でのみ接触するのを避け、できる限り多点もしくは面で接触するように衝突後の動作を生成する。図 2 に示した直立の姿勢で落下し、1 回目の衝突を検知したら姿勢に変化させ、図 10 に示す様に転がるようにして、ロボット側面を地面にならわせながら接地するようにすることとした。

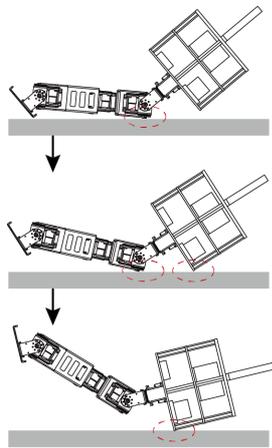


図 10 着地転倒動作の概要

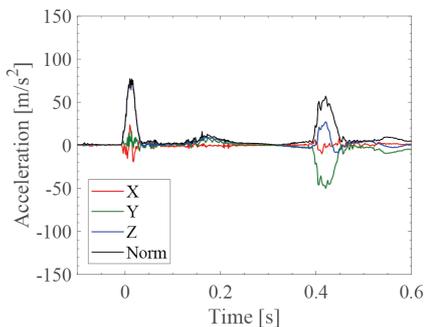


図 11 着地転倒動作を行った場合の加速度 ($h = 150$ [mm] ($V_V' = 1.7$ [m/s]))

このときの加速度履歴を図 11 に、動作の様子を図 12 に示す。図 8 (c) と比較すると、1 回目の衝突に関しては、衝突姿勢も同じであることから有意な変化は見られないが、2 回目の衝突に関しては、 140 [m/s²] 程度から 60 [m/s²] と 40%程度まで加速度を低減することに成功した。今後、この見地を元に着地

転倒動作の最適化を行う。

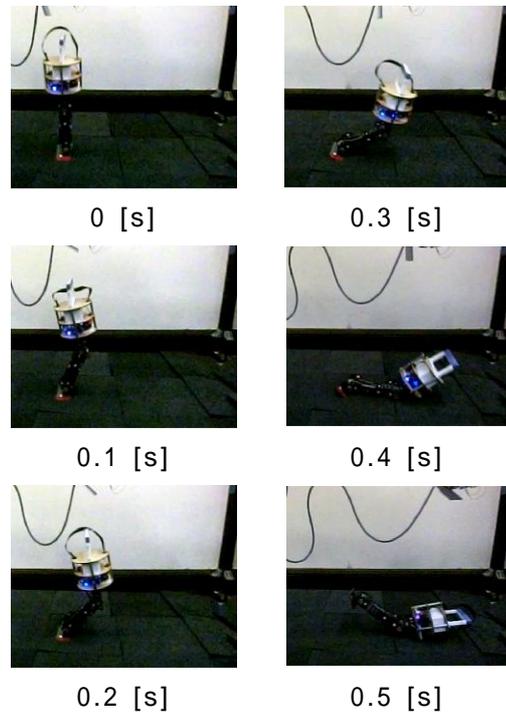


図 12 着地転倒動作の様子

(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] J. Wegereef, “SPADES: A Parafoil Delivery System for Payloads until 200kg,” in Proc. of the 17th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conf. and Seminar, AIAA2003-2110, 2003.
- [3] J. W. Whitting et al., “Parachute Landing Fall Characteristics at Three Realistic Vertical Descent Velocities,” Aviation, Space, and Environmental Medicine, vol. 78, pp. 1135-1142, 2007
- [4] K. Fujiwara et al., “Towards an optimal falling motion for a humanoid robot,” in Proc. of IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots, pp. 524-529, 2006.
- [5] S. Ha and C. K. Liu, “Multiple contact planning for minimizing damage of humanoid falls,” in Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 2761-2767, 2015.
- [6] I. Ha et al., “Development of Open Humanoid Platform DARwIn-OP,” in Proc. of SICE Annual Conf. 2011, pp. 2178-2181, 2011.
- [7] 牧川方昭, 運動のバイオメカニクス, コロナ社, 2008.

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 2 件)

辻田哲平, アルタンゲレルオドプレブ, 堀合泰生, 安孫子聡子, 近野敦, ヒューマノイドロボットによるパラシュート着地転倒動作実現に向けた小型1脚ロボットの落下試験, ロボティクス・メカトロニクス講演会'17 講演論文集, 資料番号 1A1-P12, 郡山, 5月11日, 2017.
小貫督仁, 小水内俊介, 辻田哲平, 近野敦, 着地位置制御によるヒューマノイドロボットの軟弱地面上姿勢安定化, ロボティクス・メカトロニクス講演会'16 講演論文集, 資料番号 2A1-12a7, 横浜, 6月10日, 2016

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻田 哲平 (TSUJITA, Teppei)
防衛大学校・システム工学群・准教授
研究者番号: 40554473

(2) 研究分担者

近野 敦 (KONNO, Atsushi)
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 90250688

安孫子 聡子 (ABIKO, Satoko)
芝浦工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 40560660