

月惑星探査機のアクティブ着陸脚における衝撃力緩和制御法の基礎検討

茂渡修平*, 藤本博志, 堀洋一 (東京大学), 大槻真嗣, 橋本樹明 (ISAS/JAXA)

Fundamental Research on Reduction of Impact Forces for
Active Controlled Landing Gear of Lunar-Planetary Lander
Shuhei Shigeto*, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori (The University of Tokyo)
Masatsugu Otsuki, Tatsuaki Hashimoto (ISAS/JAXA)

Abstract

Lunar-planetary landers have landed on flat areas of surface, to avoid the areas where there are a lot of rocks, craters and hills on lunar-planetary surface. For the next generation exploration, lunar-planetary landers need technologies to land on these areas to explore. In this paper, we propose predictive control for an active controlled landing gear with ballscrew linear actuator. The effectiveness of proposed method is shown by simulation and experimental results.

キーワード：アクティブ着陸脚，月惑星探査，ボールねじ，衝撃力緩和，インピーダンス制御
(Active Landing gear, Lunar Planetary Exploration, Ball Screw Actuator, Impact Force Reduction, Impedance Control)

1. はじめに

1.1 研究背景 月面に着陸し試料を採取することは，月の起源，進化の解明と今後の太陽系探査のための技術確立にもつながる。そのため，従来よりアポロ計画やルナ計画といった着陸探査が行われてきた。月探査において，着陸探査機は図1のような着陸手順をとる⁽¹⁾。探査機は，地球から月の周回軌道に進入し，徐々に高度を落とす。高度が十分に下がってくると，垂直に降下し，いったん空中静止する。最終的にエンジンを停止し，自由落下を行う。着陸の際に衝撃を吸収し，転倒しないような着陸脚が必要である⁽²⁾。

従来の着陸探査機は衝撃吸収にハニカムクラッシュコアというパッシブな機構を使用することが多かった。ハニカムクラッシュコアは，塑性変形することで衝撃を吸収することで衝撃を吸収する機構である⁽³⁾。そのため，塑性変形に至らない程度の衝撃力は十分に衝撃を吸収しない。横方向の速度がある場合や大きな岩に衝突して思わぬ跳ね返りがあると転倒してしまう可能性があり，傾斜地や岩などの障害物の多い場所に着陸することが難しい。また，予め地上試験で動作確認を行った信頼ある装置は，実際の探査機に再利用することができないという欠点も存在する。そのため，既に探査の行われてきた月面であっても，クレータ付近や月の極域のように岩石などの障害物が多く傾斜のある場所は着陸探査が難しく，着陸探査が行われてこなかった。

次世代の月惑星探査では，従来探査が行われていない地域を探査するため，障害物が多い地域においても高精度かつ安全に着陸する技術が必要である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

1.2 研究目的 パッシブな衝撃吸収機構に代わるものとして，着陸脚を積極的に駆動することで衝撃緩和と転倒防止を実現することが考えられており，本稿では，このアクティブ着陸脚について注目した。脚を駆動するアク

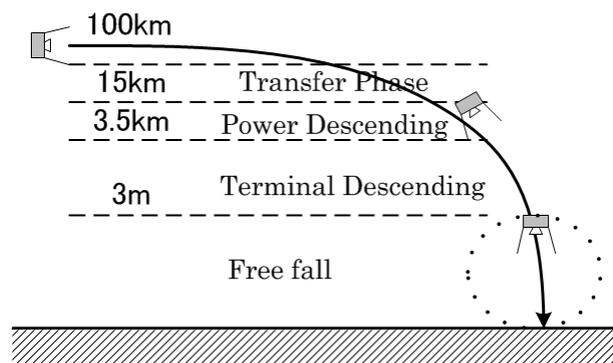


図1 着陸シーケンス

Fig. 1. Landing sequence of a lander

チュエータとしてはボールねじを使用し，衝撃吸収の基礎検討を行う。

アクティブな衝撃吸収機構の先行研究として，着陸時にカウンターウェイトを飛ばして運動量を交換することで衝撃力を吸収したり姿勢を安定化する手法が提案されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかしながら，この方式では飛ばすおもりの数に限りがあるため月面で再離陸・再着陸をする際には再利用できない。

また，従来の衝撃力緩和の手法として，呉らによる，電車ドアにおけるインピーダンス制御を用いた衝撃力緩和制御⁽⁸⁾がある。この手法では，衝撃を検出し，その力をフィードバックすることで衝撃を緩和している。しかしながら，衝撃力の速度は非常に速く，衝突が発生してから制御では十分に緩和できているとは言えない。

アクティブ着陸脚の研究としては，文献(9)による転倒防止の研究や文献(10)による着陸脚の衝撃吸収の研究がある。田口の研究⁽⁹⁾では，アクチュエータのもつ機械定数を変化させることで着地時の転倒を防止することを主に提案

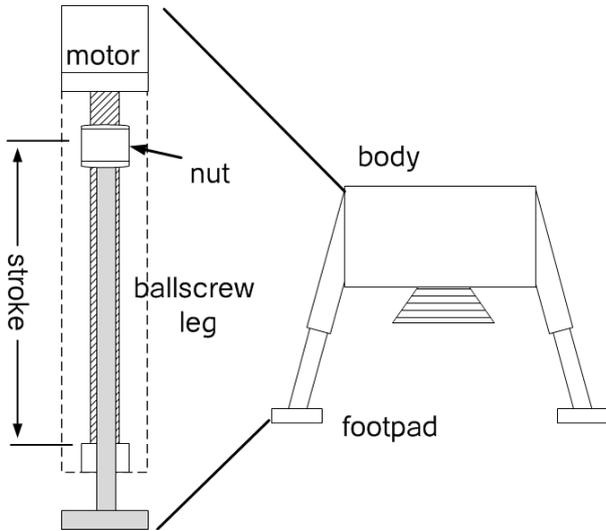


図 2 探査機の手

Fig. 2. Experimental landing gear and lander

してあり、衝撃吸収については詳しくは検討していない。

文献 (10) の研究では、関節のついたアーム型の着陸脚を動かすことで衝撃力を軽減する検討を行っている。呉らのようにインピーダンス制御を用いた衝撃緩和を行っているが、衝突過程は非常に早いため、衝撃力を大きく減らすことはできていない。そのために、衝突のタイミングが予め予想できることを利用して、衝突前に脚を駆動させることで衝撃力を緩和している。しかしながら、脚を駆動する指令値については詳しい検討は行われていなかった。

そこで本稿では、衝撃力を緩和するための着陸脚の駆動指令値の生成法を提案する。着地の瞬間の地面と脚の相対速度を減らすことで衝撃力を減らすことができるが、衝撃力を完全になくすため、接地の瞬間に相対速度が 0 m/s となるような指令値生成の式を示し、シミュレーションと実験により有効性を示した。

2. 制御対象

この節では、制御対象となる着陸脚の構成を示し、モデル化を行う。

2.1 実験装置の構成 文献 (10) では、着陸脚として関節のついたアーム型の脚を提案し、考察を行っている。本稿では、アクチュエータとしてボールねじを用いて、着陸脚とした。ボールねじを用いることの利点としては、

- 強い推力が得られる
- 既に様々の産業機器で使用されており、信頼性は高い
- 安価である

などが挙げられる。

図 2 に着陸脚の仕組みを示す。ボールねじが脚の内部に入っており、足先を直線状に動かすことができる。実験装置の大きさは、探査機を相似則に従い、月面着陸機を月と地球の重力比である 1/6 の大きさに縮小したものである。

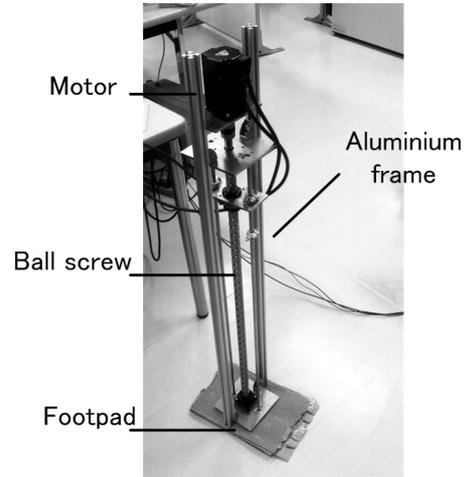


図 3 作成した実験脚

Fig. 3. Experimental landing gear

表 1 実験脚のパラメータ

Table 1. Parameters of experimental setup

Mass of body	6.1[kg]
Mass of leg	1.5[kg]
Motor power	400[W]
Stroke	55[cm]

図 3 に組み立てた実験装置の写真を示す。脚はアルミのフレームとステンレス棒で構成されており、この足部をボールねじで駆動する。着陸脚が持つべき機械特性は、機械定数を見かけ上変化させることのできるインピーダンス制御を用いて設定する。表 1 に、実験脚のおおよそのパラメータを示した。

2.2 モデル化 探査機の着陸脚を、バネ・ダンパを用いた機構としてモデル化する。本稿で提案するアクチュエータによるアクティブ制御脚も、機械バネとダンパで表すことができる。探査機を本体と着陸脚の二慣性系からなるモデルと考えた⁽⁹⁾。図 4 に着陸脚の物理モデルを示す。地面と接触しているときに発生する地面と着陸機との接触力をバネ・ダンパ k_g, c_g で模擬し、 g_m は月の重力を表している。 m_1 は探査機本体、 m_2 は探査機の足部の重量を示している。 x_1, x_2 は、着地した瞬間を基準として、足・本体の位置である。足と本体は k_l, c_l なる定数をもつ脚で接続されており、着地すると縮みながら衝撃を吸収する。同図で、(a) は飛行中、(b) は地面に着地している間のモデルである。シミュレーションでは、足の位置である x_2 の値によって (a) と (b) のモデルを切り替える。各定数は表 2 に示す値を表している。このモデルは次式で表される。

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + k_l(x_1 - x_2) + c_l(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = -m_1 g_m \\ m_2 \ddot{x}_2 + k_g x_2 + k_l(x_2 - x_1) + c_g \dot{x}_2 + c_l(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = -m_2 g_m \end{cases} \quad (1)$$

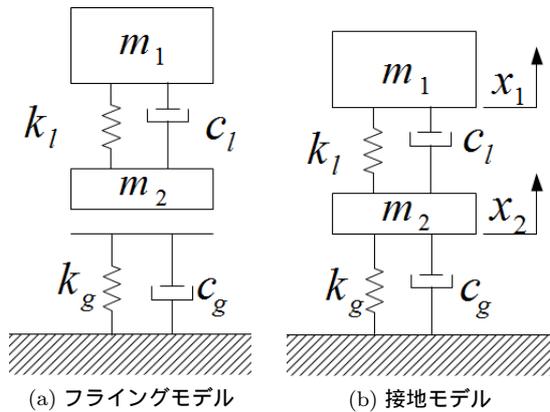


図 4 探査機モデル
Fig. 4. Physical model of a landing gear

表 2 モデルのパラメータ
Table 2. Parameters of model

m_1, m_2	Mass of Body, Leg
x_1, x_2	Position of Body, Leg
k_l	Spring Coefficient of Leg
c_l	Damping Coefficient of Leg
k_g	Spring Coefficient of Ground
c_g	Damping Coefficient of Ground
g_m	Gravity of Moon

3. 衝撃力緩和制御

3・1 衝撃力フィードバックによる衝撃緩和（従来手法）
 衝撃力緩和の手法について、呉らにより電車ドアにおけるインピーダンス制御を応用した衝撃力緩和が提案されている⁽⁸⁾。図5はインピーダンス制御を応用した衝撃力緩和制御のブロック図⁽⁸⁾を表している。 P はプラント、 P_n はノミナルプラント、 Q_{IC} は不安定零点を用いたフィルタ、 C_1, C_2 は速度フィードバックのゲイン、インピーダンス制御のゲインを示している。この図において、外乱オブザーバを用いて推定された外力 \hat{F} をそのままフィードバックするのではなく、推定値を式(2)のような不安定零点を持つ Q_{IC} フィルタを通してフィードバックすることで、衝撃力を緩和することができる。 Q_i は外乱オブザーバにおけるローパスフィルタである。 T_u, T_l はカットオフ周波数とフィードバックゲインを設定する。 $T_u = 0.1, T_l = 0.05$ としたとき、 Q_{IC} フィルタの周波数特性を図6に示す。衝撃力は高い周波数を多く含むが、高い周波数の力は位相が180度反転しフィードバックされ、ポジティブフィードバックされることにより衝撃力が緩和される。この手法では衝突が始まってから緩和をするので、衝撃力はある程度は下げられるが衝撃力の発生自体を防ぐことはできない。

$$Q_{IC} = \frac{-T_u s + 1}{T_l s + 1} Q_i(s) \dots \dots \dots (2)$$

3・2 衝突前に脚を動かす衝撃力緩和（提案手法）

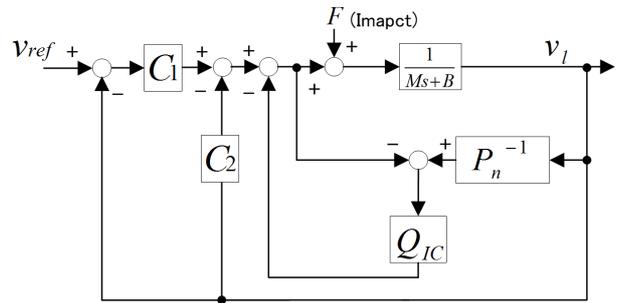


図 5 インピーダンス制御のブロック線図
Fig. 5. Block diagram of impedance control

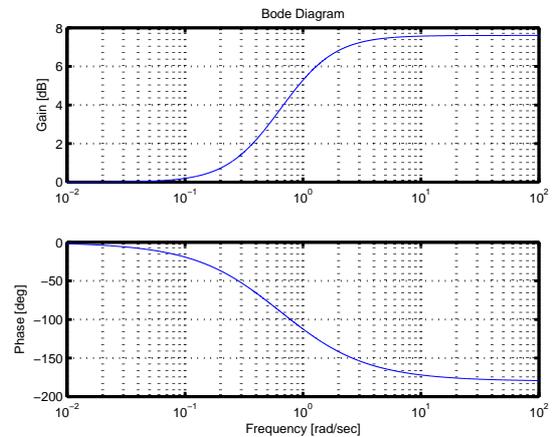


図 6 不安定零点を持つ Q フィルタの周波数特性
Fig. 6. Bode diagram of Q filter with unstable zero

3・2・1 自由落下の式に基づくフィードフォワードの加速度指令値生成法（提案 1）
 衝突の瞬間の物体間の相対速度が減れば、衝撃力は減る。文献⁽¹⁰⁾では、衝突前に脚を駆動することで衝撃力を減らす手法を提案しているが、その指令値生成には明確な指針が示されていない。しかしながら、衝突前に落下の高度と重力が正確に精度よく判明しているならば、地面と脚が相対速度 0 m/s で接触するように、着地前に脚を駆動するような指令値を生成することができる。相対速度が 0 m/s であれば、接触の瞬間には衝撃力は発生しない。

そこで、自由落下の式に基づき、フィードフォワード的に加速度指令値を生成する方法を提案する。

図7のように、脚を駆動し始める高さを H_{th} とし、月面の重力を g_m とする。脚が高度 H_{th} に達する時間を t_1 、接触する時間を t_{col} 、指令加速度 a_{ref} とすると、図4に示す探査機のモデルで、 m_2 は m_1 に比べて十分に小さいとして、次式が成り立つ。

$$v_b(t_1)T + \frac{1}{2}g_m T^2 = \frac{1}{2}a_{ref} T^2 + H_{th} \dots \dots \dots (3)$$

$$v_b(t_1) + g_m T = +a_{ref} T \dots \dots \dots (4)$$

ただし、 $T = t_{col} - t_1$ である。また、 v_b は、落下開始の高度を H_0 と置くと、

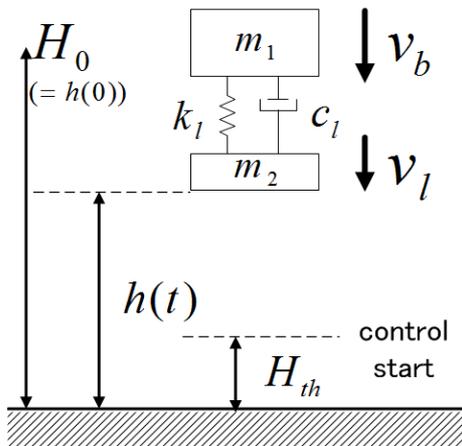


図7 探査機落下のモデル化

Fig. 7. The model of free-falling lander

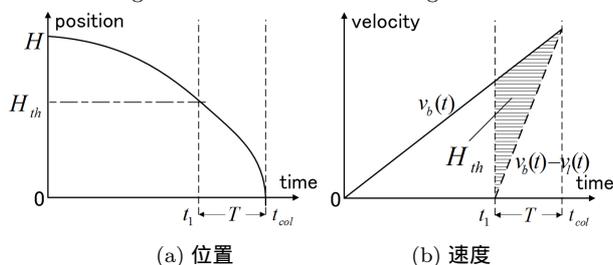


図8 衝突までの位置と速度

Fig. 8. The velocities of leg and body before collision

$$v_b(t_1) = \sqrt{2g_m(H_0 - H_{th})} \dots \dots \dots (5)$$

となる。式 (3), 式 (4), 式 (5) を加速度指令値 a_{ref} について解くと, 接地の瞬間に地面と脚が相対速度 0 m/s となる指令値が導出される。

$$a_{ref} = \frac{H_0}{H_{th}} g_m \dots \dots \dots (6)$$

式 (3), 式 (4) を図示すると, 図 8 となる。斜線部が表しているのが脚と地面の間の距離であり, 式中で H_{th} で表されている。地面との接触後には, 徐々に減速するような制御に切り替え静止する。減速については, 姿勢安定化のためにインピーダンス制御により適切な減衰定数を設定するのが好ましい⁽⁹⁾ が, ここでは簡単のため一定加速度で減速する指令値を入れた。

制御ブロックを図 9 に示す。これは, 図 5 の速度指令値の部分に加速度指令値を入れたものである。ただし, 脚の制御は速度指令値に追従するような速度制御を用いればよく, インピーダンス制御は必ずしも必要ではない。衝撃力緩和のためのインピーダンス制御を単独で使用した場合に比べて良い結果が得られることを示すためインピーダンス制御の速度指令に提案手法で生成した指令値を使う。

3.2.2 センサによるフィードバック的加速度指令値生成法 (提案 2) 前節の指令値生成法では, 衝突のタイミングや落下の高度があらかじめ正確に精度よく判明してい

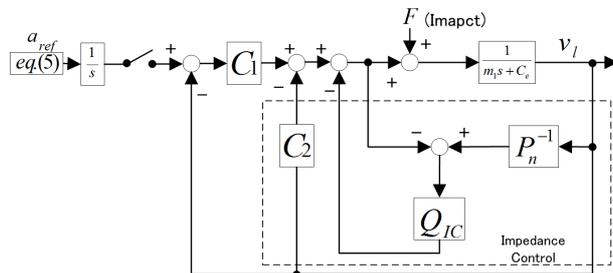


図9 提案手法 (1) のブロック図

Fig. 9. Block diagram of control with acceleration reference

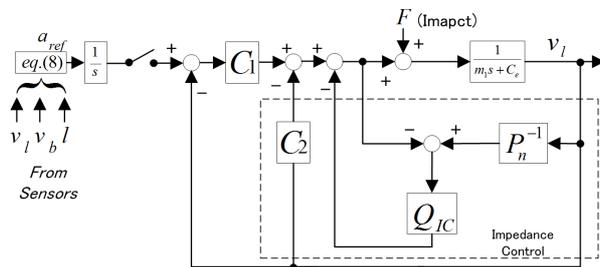


図10 提案手法 (2) のブロック図

Fig. 10. Block diagram of control with acceleration reference with sensors

るという前提で計算されている。しかしながら, 実際には落下開始の高度が変動することが考えられる。そこで, センサーで現在の高度・落下速度・脚速度を取得し, 制御周期ごとに指令値を計算することで地面と脚の相対速度が 0 m/s になる加速度指令値の生成法を検討する。

指令値は, 脚を一定の加速度で加速するという仮定で計算する。現在の高度を $h(t)$, 加速度の指令値を $a_{ref}(t)$ として,

$$v_b(t)T + \frac{1}{2}g_mT^2 = \frac{1}{2}a_{ref}(t)T^2 + Tv_h(t) + h(t) \cdot (7)$$

$$v_b(t) + g_mT = v_h(t) + a_{ref}(t)T \dots \dots \dots (8)$$

式 (7), 式 (8) を加速度指令値について解くと, 次式が導出される。

$$a_{ref}(t) = \frac{1}{2h(t)}(v_b(t) - v_h(t))^2 + g_m \dots \dots \dots (9)$$

これは, 距離センサのデータや落下開始の高度の想定値と実際の値に一切の誤差が無い時には提案手法 (1) と同じ結果になる。ブロック図を図 10 に示す。

4. シミュレーション

本節では, 3 の従来手法と提案手法をシミュレーションで確認する。シミュレーションでは, 実験と同じ衝撃力が発生するように地面のバネ定数 K_e , 粘性定数 C_e を $C_e = 200, K_e = 1000$ と設定した。実験装置は高さ 0.3m から落下させるものとする。提案手法 (1) では, 高さ 0.3m から落下させるものとして指令値の計算を行った。

図 11 は, 落下速度と脚速度を比較したものである。本体

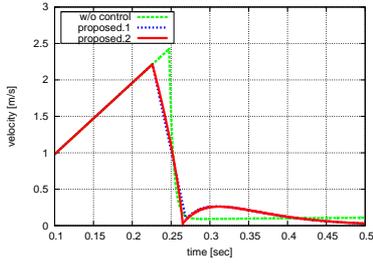


図 11 相対速度のシミュレーション結果
Fig. 11. Simulation result of relative velocity between leg and ground

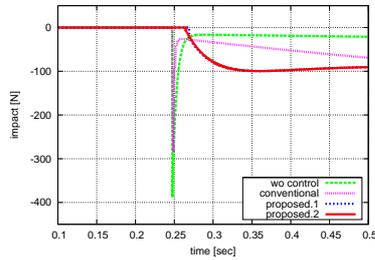


図 12 想定高度から落下させた場合の衝撃力のシミュレーション結果
Fig. 12. Simulation result of impact force($H_0=0.3m$)

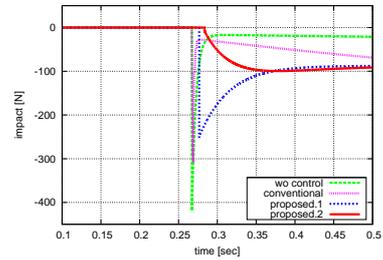


図 13 想定高度より高い高度から落下した場合の衝撃力のシミュレーション結果
Fig. 13. Simulation result of impact force($H_0=0.35m$)

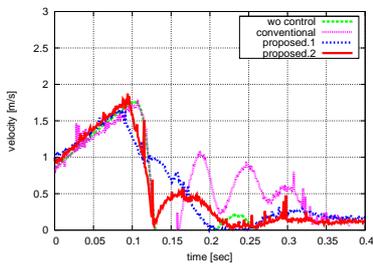


図 14 想定高度から落下させた時の脚-地面間相対速度
Fig. 14. Experimental result of relative velocity between leg and ground

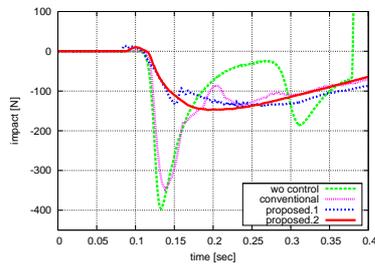


図 15 想定高度から落下させた時の衝撃力
Fig. 15. Experimental result of impact force($H_0=0.3m$)

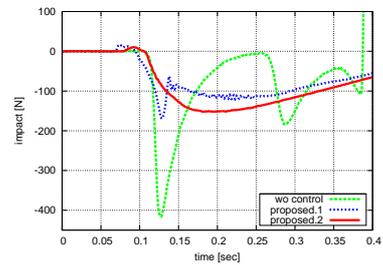


図 16 想定高度より高い高度から落下した場合の衝撃力の実験結果
Fig. 16. Experimental result of impact force($H_0=0.35m$)

速度は自由落下の式から想定される速度を示した。接触直前に相対速度はほぼ 0 m/s となっているのが分かる。接触後は減速するよう制御を切り替えているため、徐々に減速しているのが分かる。

図 12 は衝撃力緩和のシミュレーションを行った結果である。図 12 に、接触の瞬間の拡大図を示す。従来手法では衝撃が発生しているが、ある程度減少しているのが分かる。また、提案手法 (1) の場合も提案手法 (2) の場合も衝突の瞬間の衝撃力が 0 N となっている。シミュレーションでは誤差の無い理想的な状態を再現できるため、センサの有無にかかわらず衝撃力を完全になくすことができている。接触後に発生している力は、脚が本体重量を支え減速していることにより発生している。

以上のシミュレーションは、探査機が想定した高さから落下した場合であり、実際の落下高度は想定と異なることが考えられる。そこで、落下開始の高度を $0.35m$ としてシミュレーションを行った。図 13 がその結果である。提案手法 (1) の場合には接地のタイミングがずれてしまうため衝撃力が発生しているが、センサを用いた場合には衝撃力は発生しない。

5. 実験結果

実験では、地面の模擬のために緩衝材と段ボールパネルを用いている。それぞれの制御法で実験を行った結果を以下に示す。実験は地球上で、高度 $0.3m$ から落下させて行った。最高速度がシミュレーション結果と異なるのは、実験

装置を垂直に落下させるために設置したガイドレールの摩擦による。

提案手法 (1) では、シミュレーション同様に高さ $0.3m$ から落下させるものとして指令値の計算を行った。図 14 は、速度の実験結果である。図 18 に、衝突の瞬間の拡大図を示す。提案手法 (1)(2) では共に衝突の瞬間の相対速度が減っているのが分かる。また、制御なしの場合、従来手法の場合で負の速度が出ているのは、脚が跳ね返りで戻っていることを示している。逆に、提案手法で接触後に脚の速度が正なのは地面に沈み込んでることを示している。

図 15 に実験で得られた衝撃力を示す。従来手法で行った場合、衝撃力はある程度は減るが発生自体は防げているわけではない。また、提案手法 (1) の場合は衝撃力は減っているものの、完全に消えているわけではない。これは提案手法 (1) では完全にタイミングや高度が合っていないと相対速度が 0 m/s とならないからである。

図 16 は、落下高度が実際より高かった場合の結果を示している。実際に落下が始まる高度が予め想定したものと異なる場合、衝撃力が発生する。提案手法 (2) の場合には、センサを用いて逐次指令値を計算しているため、落下開始の高度に関わらずアクチュエータの能力の範囲内であれば衝撃力を緩和する。

6. まとめ

月惑星探査機において、アクティブ着陸脚を用いて着陸時の衝撃力緩和を行った。従来手法による衝撃力緩和では、

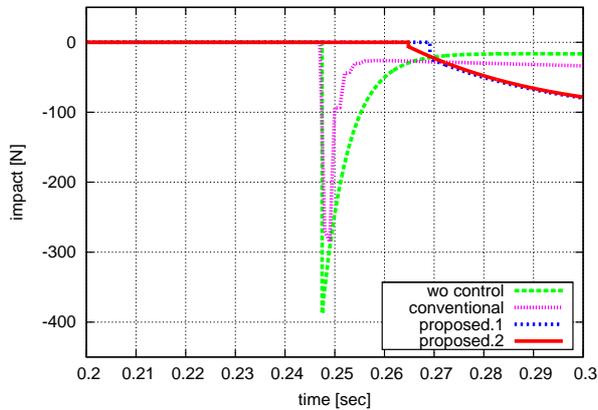


図 17 衝撃力のシミュレーション結果 (拡大図)

Fig. 17. Simulation result of impact force(zoom)

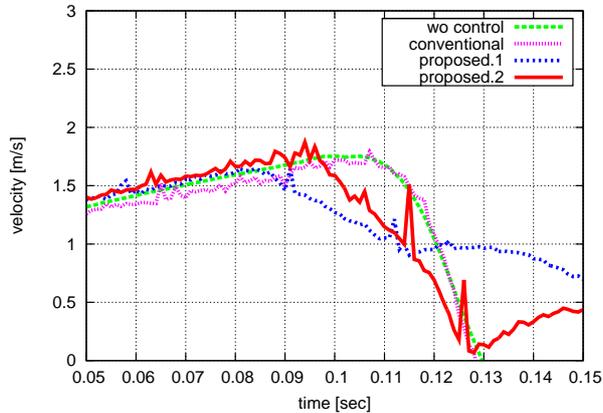


図 18 脚-地面相対速度の実験結果 (拡大図)

Fig. 18. Experimental result of relative velocity(zoom)

衝突が発生してから衝撃を吸収するため、衝撃力の緩和量に限界があった。それに対し、提案手法 (1) では衝撃力のある程度の緩和が確認された。しかしタイミングのズレに弱いという問題があった。提案手法 (2) では、センサを使用して、地面と接触する瞬間、脚と地面の相対速度がゼロとなるよう制御することで衝撃力をほぼゼロとすることができた。

接地の瞬間の脚-地面間の相対速度を制御することができたため、着陸時の転倒防止・姿勢安定化にもつながると考えられる。

参考文献

- (1) 橋本樹明, 田中智, 星野健, 大嶽久志, 大槻真嗣, 「月着陸・探査ミッション (SELENE-2) の現状について」, 第 11 回宇宙科学シンポジウム (2011)
- (2) SELENE-B 検討グループ, 「着陸脚と衝撃吸収・転倒防止機構」, SELENE-B シンポジウム (2001)
- (3) Akira Miyahara, Ken Higuchi, Kohtarou Matumoto, Yasuo Shinomiya, Shigeru Aoki, Kazuo Iwasaki, Hiromitsu Miyaki, Hirozaku Shoji, Kazuya Yoshida, Haruhisa Katou, Masahiro Nohmi: "Research of Land-

ing Gear Subsystem for Lunar Lander", Uchu Kagaku Gijutsu Rengo Koenkai Koenshu, Vol.47, pp. 119-204 (2003)(in Japanese)

- (4) Tatsuaki Hashimoto, Satoshi Tanaka, Takeshi Hoshino, "Present study status of lunar lander SELENE-2", Uchu Kagaku Gijutsu Rengo Koenkai Koenshu, Vol.51, 2A05 (2007)(in Japanese)
- (5) Tatsuaki Hashimoto, Takeshi Hoshino, Satoshi Tanaka, Masatsugu Otsuki, Hisashi Otake, Hitoshi Morimoto: "JAPANESE MOON LANDER SELENE-2 - PRESENT STATUS IN 2009", Acta Astronautica Vol.68, pp1386-1391 (2011)
- (6) Tatsuhiro Iio, Hiroshi Matsuhisa, Hideo Utsuno, Keisuke Yamada, Katsutoshi Sawada, "Reduction of Landing Impact of Spacecraft by Means of Momentum Exchange", Uchu Kagaku Gijutsu Rengo Koenkai Koenshu, Vol.54, 3A08 (2010)(in Japanese)
- (7) Susumu Hara, Ryosuke Ito, Masatsugu Otsuki, Yoji Yamada (Nagoya University), Takashi Kubota, Tatsuaki Hashimoto, Hiroshi Matsuhisa, Keisuke Yamada: "Shock Response Control for Landing of Planetary Exploration Spacecraft by Means of MEID Mechanisms", Uchu Kagaku Gijutsu Rengo Koenkai Koenshu, Vol.54, 3A09 (2010)(in Japanese)
- (8) Sehoon Oh, Yoichi Hori, "Experimental Study on Impedance and Impact Force Control by Position Feedback Control", IIC-09-117, pp. 31-36 (2009)(in Japanese)
- (9) Katsuya TAGUCHI, Tatsuaki HASHIMOTO and Masatsugu OTSUKI, "Dynamic Touchdown Control for Safe and Precise Landing Using Active Landing Leg", Uchu Kagaku Gijutsu Rengo Koenkai Koenshu, Vol.53, 2D05 (2009)(in Japanese)
- (10) Takao MAEDA, Tatsuaki HASHIMOTO, Masatsugu OTSUKI, Shinichiro SAKAI, "Development of Active Controlled Landing Gear Experiment System for the Lunar-Planetary Lander", MOVIC2011 (2011)(in Japanese)
- (11) Kunio Kobayashi, Oh Sehoon, Shigeki Inatama, Yoichi Hori, "A 2DOF Intelligent control Approach for Train Doors Using Environmental Stiffness Estimation", IIC-09-116, pp.25-29 (2009)