

# タンブリング衛星捕獲のための相対回転制御に向けた接触ダイナミクス

## Contact Dynamics for Relative Rotation Control of Tumbling Space Debris

正 永岡健司 (東北大) 非 小林明誉 (東北大) 正 吉田和哉 (東北大)

\*Kenji NAGAOKA, Tohoku University, nagaoka@astro.mech.tohoku.ac.jp  
Akinori KOBAYASHI, Tohoku University, a-kobayashi@astro.mech.tohoku.ac.jp  
Kazuya YOSHIDA, Tohoku University, yoshida@astro.mech.tohoku.ac.jp

Space debris mitigation is a key technology for on-orbit servicing. In order for secure capture of space debris by a space robot, contact control with translational and rotational motion is necessary for detumbling and grasping the debris. This paper elaborates on collision experiments in micro-gravity and numerical simulations based on contact dynamics model. We examined contact characteristics with/without mechanical compliance, which is equipped on the space robot and needed for contact control by its robotic arms. On the basis of these analyses, we introduce theoretical contact conditions for relatively detumbling. The validity of the conditions is experimentally shown by using air-floating test beds in planar micro-gravity. The result contributes to relative motion control after contact.

**Key Words:** Space robot, Contact dynamics, Relative rotation control, Micro-gravity environment

### 1 序 論

運用の停止や故障した機能不全衛星（デブリ衛星）は、軌道上環境の保全の大きな弊害である。その解決策として、図1のような自律ロボットによるデブリ回収が検討されている。一般に、デブリ衛星（以後、ターゲットと称す）は姿勢制御機能を失い、タンブリング運動を伴う。そのため、捕獲作業を行う宇宙ロボット（以後、チェイサと称す）は、接触を介して浮遊ターゲットの複雑な並進回転運動の制御が必要となる。この接触問題に対して、これまで並進と回転の運動を独立に扱った研究が進められてきた。筆者らのグループでは、アーム制御によるターゲット並進相対運動の反発係数制御を実現している [1-3]。西田ら [4] は弾性ブラシを利用したターゲットの角運動量減衰手法を提案している。これらに代表される接触制御研究の発展として、並進と回転の両方の運動を考慮した接触力制御手法の確立が求められており、筆者らはこれまで微小重力下での二次元接触現象に関する実験的解析を行い、接触を介した二次元浮遊系の運動特性を整理している [5]。また、地上ロボットアームを用いた浮遊衛星捕獲のハイブリッドシミュレーション [6-9] もあるが、高周波な接触現象を実験的に模擬するには、時間遅れ補償などの課題が残る。

軌道上の浮遊系では、接触力は並進と回転の両方の運動へ同時に作用することが基本となる。接触現象の離散モデルとして、Brach [10, 11] は接触前後の運動状態を含む反発係数と力積比に基づく理論的枠組みを構築した。一方、アームで接触力を制御するには、接触力を連続的な時間関数でモデル化する必要がある。この接触力モデルに関しては、古くから力学問題として代表的な点接触モデル [12] が示されているが、実際の接触現象はシステムや接触条件への依存性もあり、実験的検証が欠かせない。また、多次元化した接触力と運動を考慮したアーム制御による浮遊系の動力学解析は、現状では十分になされていない。さらに、アームによる接触力制御を想定した場合、機械的応答性の確保と衝撃ピークの緩和のため、アーム手首などに低剛性なコンプライアンス機構の導入が必須となる。このような、低剛性を介在させた接触系では接触時間が増加し、接触中の並進回転運動は連続的に変化することになるため、時々刻々と変化する接触状態を考慮した解析・制御が必要となる。特に、未知ターゲットの回転制御に向けた理論的条件式の導出が必要となる。

そこで本稿では、まず剛体同士の浮遊系の接触力学に関する定式化について述べ、それに基づきタンブリング運動を有するターゲットの回転を接触により停止させるための理論条件の導出を行う。次いで、地上の微小重力模擬実験との比較解析を行い、導出した理論条件の妥当性を検証する。

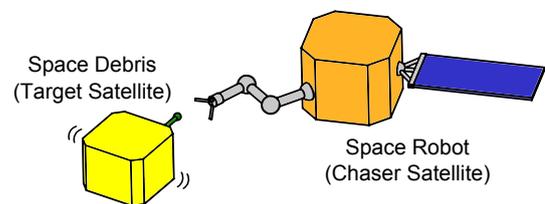


Fig. 1 Schematic of capture of space debris by a space robot

### 2 接触力学モデル

#### 2.1 衛星捕獲モデル

本稿では、図2のようにチェイサの点  $P$  とターゲットの点  $P'$  との衝突を考える。モデル化に際し、以下の前提条件をおく。

- 重力加速度はゼロ
- チェイサのベース、およびターゲットは剛体
- チェイサとターゲットの質量、重心、慣性モーメントは既知
- 接触は点接触であり、接触点間で摩擦は生じない

#### 2.2 力とトルクの等価換算

まず、慣性座標系  $\Sigma_O \{x, y, z\}$  を定義する。また、接触現象は  $xy$  平面での二次元接触運動とし、チェイサの接触点座標系  $\Sigma_P \{n, t, b\}$ 、チェイサ重心座標系  $\Sigma_A \{x_A, y_A, z_A\}$ 、ターゲット重心座標系  $\Sigma_B \{x_B, y_B, z_B\}$  を定義する。ただし、 $x_A$  軸と  $n$  軸は平行、かつ  $y_B$  軸は接触面と平行とする。次に、チェイサとターゲットの重心から各接触点までの位置ベクトルを各々  $\mathbf{r}_{AP} = [r_{AP_x} \ r_{AP_y} \ r_{AP_z}]^T$ 、 $\mathbf{r}_{BP'} = [r_{BP'_x} \ r_{BP'_y} \ r_{BP'_z}]^T$  と与える。これらを用いて、点  $P$  での作用力とトルクを重心  $A$  への作用力  $\mathbf{F}_A$ 、トルク  $\mathbf{N}_A$  とし、同じく点  $P'$  での作用力とトルクを重心  $B$  への作用力  $\mathbf{F}_B$ 、トルク  $\mathbf{N}_B$  に換算すると、それぞれ  $\mathbf{F}_A = -\mathbf{F}_B = -\mathbf{F}_P$ 、 $\mathbf{N}_A = -\mathbf{r}_{AP} \times \mathbf{F}_P$ 、 $\mathbf{N}_B = \mathbf{r}_{BP'} \times \mathbf{F}_P$  と表現できる。ただし、 $\mathbf{F}_P$  はターゲットへの接触力ベクトルとする。

#### 2.3 接触力モデル

##### 2.3.1 チェイサとターゲットの剛体接触モデル

剛体同士の接触現象において、接触力  $\mathbf{F}_P$  は物体間で仮想的なめり込みが発生すると考え、めり込み量  $\delta$  とめり込み速度  $\dot{\delta}$  による接触力モデル [12] が作用すると仮定する。このとき、めり込み方向は、チェイサ手先の球形に対してターゲット接触面からの距離が最も離れた位置を接触点  $P$  として  $\delta$  を与える。特に、本稿ではチェイサのアーム長方向  $x_A$  軸を接触点の法線方向とした。これに基づき、接触力を法線方向  $n$  軸と接線方向  $t$  軸に分解

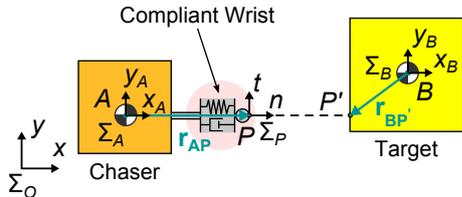


Fig. 2 Planar contact model in target capture by a chaser

し、それぞれ線形バネ・ダンパモデルで二次元的にモデル化する。ここで、図3に示すように、 $\delta$ を $x_A$ 軸方向成分 $\delta_n$ と $y_A$ 軸方向成分 $\delta_t$ に分解し、接触点の剛性係数と粘性減衰係数を $x_A$ 軸方向の係数 $k_n, c_n$ と $x_B$ 軸方向の係数 $k_t, c_t$ に分けて考える。以上まとめると、接触力ベクトル $F_p$ は次式で与えられる。

$$F_p = \begin{bmatrix} F_n \\ F_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_n \delta_n + c_n \dot{\delta}_n \\ k_t \delta_t + c_t \dot{\delta}_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、 $F_n$ は $F_p$ の $n$ 軸方向成分、 $F_t$ は $t$ 軸方向成分とする。

### 2.3.2 手首コンプライアンス機構を搭載したチェイサとターゲットの接触モデル

前述の剛体接触力モデルにおいて、一般に接触パラメータを事前に予測することは容易ではなく、接触周波数も極めて高い。そのため、接触力ピークが過大になると共に、アームによる接触制御の応答性が不十分となる。これまで本研究グループでは、チェイサ手首部に機械的コンプライアンス機構(コイルバネ)を導入し、その実用性を示している[2,3]。これは、低剛性なバネ要素で接触周波数や複雑かつ不確かな接触特性を代表させることにより、アームによる接触力制御を可能とする手法である。

このような手首コンプライアンス機構を搭載する場合、接触力は手首機構の変形量を用いて表すことができる。手首機構の変形方向は、図2に示す $x_A$ 軸方向となるため、 $\delta_n$ をコイルバネの変形量とし、剛性係数と粘性減衰係数をそれぞれコイルバネの機械的特性値 $k_w (= k_n), c_w (= c_n)$ と定義し直す。また、 $t$ 軸方向の接触力 $F_t$ は、変形量 $\delta_t$ を $\delta_n$ より再定義することで、式(1)と同様の形式にて表現できる。したがって、接触力モデルは手首機構の有無に依らず、式(1)と同一形式にて表される。

## 3 相対回転運動の停止条件

本章では、離散モデルと連続モデルに対して、アームを用いない接触により相対回転運動ゼロとするターゲット接触位置を導出する。ただし、理想的な接触位置は $r_{BP'_x} = r_d$ と定める。

### 3.1 離散モデルに基づく解法

#### 3.1.1 接触パラメータの定義

ここでは、まずチェイサとターゲットの衝突前後の相対運動を表すパラメータとして、各接触点 $P, P'$ に対する反発係数 $\epsilon_n$ を定義する。各接触点におけるチェイサとターゲットの衝突前の速度ベクトルを $v_c, v_t$ 、衝突後の速度ベクトルを $V_c, V_t$ とおく。また、衝突前の角速度ベクトルをそれぞれ $\omega_c, \omega_t$ 、衝突後の角速度ベクトルを $\Omega_c, \Omega_t$ とおくと、接触前後の相対速度ベクトル $v_r, V_r$ は一般に次式で表すことができる。

$$\begin{cases} v_r = v_t + \omega_t \times r_{BP'} - v_c - \omega_c \times r_{AP} & \text{Before Contact} \\ V_r = V_t + \Omega_t \times r_{BP'} - V_c - \Omega_c \times r_{AP} & \text{After Contact} \end{cases} \quad (2)$$

これにより、接触点の法線反発係数 $\epsilon_n$ を次式で与える。

$$\epsilon_n = -\frac{V_r \cdot x_B}{v_r \cdot x_B} \quad (3)$$

ただし、 $x_B$ は $\Sigma_B$ における $x_B$ 軸の単位ベクトルを表す。また、 $\Sigma_O$ に対する $\Sigma_B$ への回転行列は時変であるため、各単位ベクト

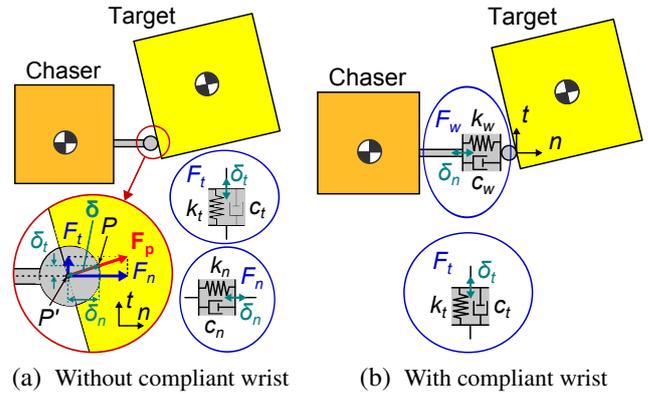


Fig. 3 Contact force model between a chaser and a target based on linear spring-dashpot model

ルは接触直前と直後の各瞬間で与えるものとする。

また、力積比 $\mu$ を以下のように定義する[10]。

$$\mu = \frac{\mathcal{P} \cdot y_B}{\mathcal{P} \cdot x_B} \quad (4)$$

ここで、 $\mathcal{P}$ は接触点での力積ベクトルである。

#### 3.1.2 回転停止条件の導出

剛体同士での相対回転停止の条件として、 $\Omega_t - \Omega_c = 0$ より、以下に示す $r_d$ の二次方程式および解を得る。

$$Ar_d^2 + Br_d + C = 0 \implies r_d = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (5)$$

ただし、

$$\begin{cases} A = \frac{\omega_c + \epsilon_n \omega_t}{(1 + \epsilon_n) I_t} \\ B = -\frac{\omega_t (r_{AP_y} - \mu r_{AP_x})}{I_c} - \frac{v_{t_x} - v_{c_x} + \omega_c r_{AP_y} - \mu r_{BP'_x} \frac{\omega_c + \epsilon_n \omega_t}{1 + \epsilon_n}}{I_t} \\ C = \frac{(m_c + m_t)(\omega_c - \omega_t)}{m_c m_t (1 + \epsilon_n)} \left\{ 1 + \frac{m_c m_t r_{AP_y} (r_{AP_y} - \mu r_{AP_x})}{I_c (m_c + m_t)} \right\} \\ \quad + \left( \frac{r_{AP_y} - \mu r_{AP_x}}{I_c} + \frac{\mu r_{BP'_x}}{I_t} \right) (v_{t_x} - v_{c_x} - \omega_c r_{AP_y}) \\ v_c = [v_{c_x} \ v_{c_y} \ 0]^T, \quad v_t = [v_{t_x} \ v_{t_y} \ 0]^T \\ \omega_c = [0 \ 0 \ \omega_c]^T, \quad \omega_t = [0 \ 0 \ \omega_t]^T \end{cases} \quad (6)$$

とし、 $m_c$ と $m_t$ は各々チェイサおよびターゲットの質量、 $I_c, I_t$ はチェイサおよびターゲットの重心の $z_A, z_B$ 軸周りでの慣性モーメントとする。速度・角速度ベクトルは三次元で表現しているが、実質的には二次元モデルに置き換えている。

また、接触力の作用方向をターゲットの回転運動減衰の方向とすると、接触位置の拘束条件として、 $\text{sgn}(\omega_t) = \text{sgn}(r_d)$ が与えられる。これにより、式(5)の解は、ターゲットとの相対回転を停止させるための接触位置 $r_d$ を一意的に導出することが可能となる。本モデルは、接触前の運動状態と、接触パラメータ $\epsilon_n, \mu$ に基づく接触による回転停止条件である。

#### 3.2 連続モデルに基づく解法

次に、連続的な接触力モデルに基づく $r_d$ を導出する。まず衝突前後でのチェイサとターゲットの角運動量変化より、

$$\begin{cases} I_c (\Omega_c - \omega_c) = \int_{t_i}^{t_f} (r_{AP_x} F_{A_y} - r_{AP_y} F_{A_x}) dt = N_{A_z} \\ I_t (\Omega_t - \omega_t) = \int_{t_i}^{t_f} (r_{BP'_x} F_{B_y} - r_{BP'_y} F_{B_x}) dt = N_{B_z} \end{cases} \quad (7)$$

を得る。ただし、 $t_i, t_f$ は接触の開始、終了の時刻である。したがって、接触位置条件 $r_d$ は $\Omega_t - \Omega_c = 0$ より、以下で表せる。

$$r_d = \frac{\int_{t_i}^{t_f} (r_{BP'_x} F_{B_y} - \frac{I_t}{I_c} N_{A_z}) dt + I_t (\omega_t - \omega_c)}{\int_{t_i}^{t_f} F_{B_x} dt} \quad (8)$$

ここで、 $F_{Ax}$ ,  $F_{Ay}$  は  $F_A$  の  $x_A$  軸および  $y_A$  軸の成分を表し、 $F_{Bx}$ ,  $F_{By}$  は  $F_B$  の  $x_B$  軸および  $y_B$  軸の成分を表す。また、 $N_{Az}$ ,  $N_{Bz}$  はそれぞれ  $N_A$  の  $z_A$  軸回りと  $N_B$  の  $z_B$  軸回りでのトルク成分である。一般に、式 (8) の条件式は解析的には解くことができないため、本式を満たす  $r_d$  は数値積分により算定される。

#### 4 二次元微小重力における相対回転制御実験

本章では、前章で構築した相対回転停止条件に基づき、相対回転制御の実験的検証を行う。

##### 4.1 実験環境

まず、二次元微小重力実験を行うための空気浮上装置を用いたテストベッド(チェイサおよびターゲット)について述べる。テストベッドは、空気タンクの圧縮空気をエアベアリング(NEWWAY社製)から吹き出すことで、安定した空気浮上が実現可能となる。これにより、石定盤上での摩擦なしの二次元平面運動を模擬した。チェイサの手先には、Nitta社製の6軸力覚センサを搭載し、手先への外力とモーメントを計測可能な構成とし、また手首部のバネ機構は着脱可能な設計とした。実験中のチェイサとターゲットの運動履歴は、NaturalPoint社製のモーション・トラッキング・カメラシステムを用いて、相対位置誤差1mm以下の精度でそれぞれ計測した。また、実験において、所望の初期条件(並進回転速度)を与えるため、バネ発射装置を用いた。実験環境の外観を図4に、テストベッドを図5に示す。

##### 4.2 実験条件とシミュレーションパラメータ

次に、実験条件とシミュレーションパラメータについて述べる。

###### 4.2.1 手首コンプライアンス機構を搭載しない場合

各慣性パラメータとしては、 $m_c = 5.80$  [kg],  $m_t = 4.61$  [kg],  $I_c = 0.043$  [kg/m<sup>2</sup>],  $I_t = 0.043$  [kg/m<sup>2</sup>] とし、初期運動パラメータは、 $v_c = 0.039$  [m/s],  $v_t = -0.123$  [m/s],  $\omega_c = 0$  [rad/s],  $\omega_t = -0.7$  [rad/s] と設定した。また、実験結果における接触力のピーク値と接触時間が整合するようにシミュレーションモデルの接触パラメータを決定し、それぞれ  $k_n = k_t = 100$  [kN/m],  $c_n = c_t = 490$  [Ns/m] とした。以上のパラメータより、相対回転停止条件を算出すると、 $r_d = -0.065$  [m] と導出できる。

###### 4.2.2 手首コンプライアンス機構を搭載した場合

各慣性パラメータとしては、 $m_c = 5.87$  [kg],  $m_t = 15.02$  [kg],  $I_c = 0.043$  [kg/m<sup>2</sup>],  $I_t = 0.107$  [kg/m<sup>2</sup>] とし、初期運動パラメータは、 $v_c = 0.037$  [m/s],  $v_t = -0.057$  [m/s],  $\omega_c = 0.170$  [rad/s],  $\omega_t = -0.392$  [rad/s] と設定した。また、初期相対角度差の条件として、 $v_c$  と  $v_t$  は  $\cos^{-1} \left( \frac{v_t \cdot v_c}{|v_t| |v_c|} \right) |_{t=0} = 1.5$  [°] と与えられている。また、接触パラメータについても同様に決定し、 $k_w = 900$  [N/m],  $k_t = 3.00$  [kN/m],  $c_w = 2.50$  [Ns/m],  $c_t = 80.0$  [Ns/m] とした。以上のパラメータより、相対回転停止条件を算出すると、 $r_d = -0.062$  [m] と導出できる。

##### 4.3 実験結果とシミュレーション比較

実験結果とシミュレーションの結果についての比較を行う。ただし、チェイサとターゲット間での接触は、時間  $t = 0$  [s] を接触開始時刻とする。

###### 4.3.1 手首コンプライアンス機構を搭載しない場合

チェイサの手先部が剛体の場合の結果について述べる。図6(a)に実験とシミュレーションにおけるチェイサとターゲットの挙動を示す。なお、シミュレーションの初期条件として、実験時のチェイサとターゲットの衝突開始時の初期相対角度  $1.9^\circ$  を考慮した。図6(a)より、チェイサとの衝突によってターゲットの回転運動が停止し、衝突後は並進運動のみになっていることが分かる。また、衝突後のチェイサとターゲットの挙動は、実験とシミュレーションでよく一致していることも確認できる。

次に、図7に各変数の時間履歴を示す。図7(a)および図7(b)はそれぞれチェイサの  $x$  軸方向の速度およびターゲットの  $x$  軸方向の速度、図7(c)はターゲットの角速度、図7(d)は  $x$  軸方向の接触力の時間履歴を示している。速度および角速度は慣性座

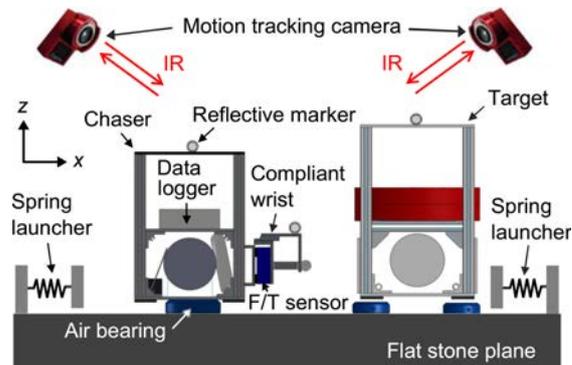
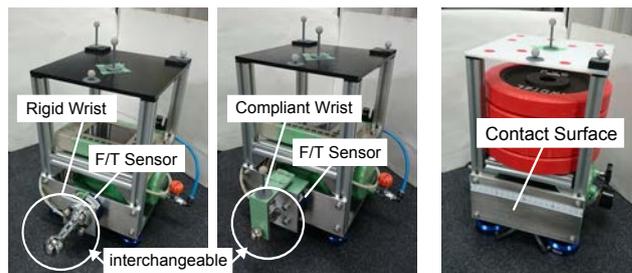


Fig. 4 Overview of experimental setup



(a) Chaser w/ and w/o compliant wrist

(b) Target

Fig. 5 Air-floating test beds for 2D micro-gravity emulation

標系で、接触力はチェイサ座標系で表している。まず、図7(a), 7(b)より、チェイサとターゲットの速度履歴が接触時に急激に変化することが分かる。また、ターゲットの角速度については、図7(c)より、衝突後に0radとなることが確認できる。併せて、チェイサ角速度も0radとなっていたことにより、導出した接触位置条件  $r_d$  により定義された相対角度制御の妥当性が検証できたといえる。さらに、図7(d)より、 $x$  軸方向の接触力ピークは  $-160.2$  N、接触時間はおおよそ9msであった。なお、 $y$  軸方向については、ほとんど接触力は発生しなかった。以上の結果については、実験結果とシミュレーション結果との比較において整合しており、ターゲットが初期運動を有する場合においても、数学モデルによって接触力や並進・回転運動の関係が適切に表現できているといえる。

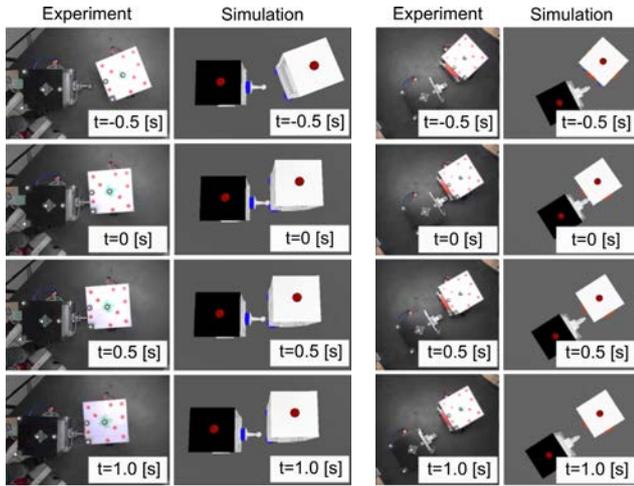
以上より、手首コンプライアンス機構を搭載していない剛体のチェイサとターゲットの衝突について、衝突前のターゲットの運動が分かれば、理論的に導出した接触位置条件からターゲットの回転運動を停止させることができることが確認できた。

###### 4.3.2 手首コンプライアンス機構を搭載した場合

チェイサに手先コンプライアンス機構を搭載した場合の結果について述べる。図6(b)に実験とシミュレーションにおけるチェイサとターゲットの挙動を示す。なお、シミュレーションの初期条件として、実験時のチェイサとターゲットの衝突開始時の初期相対角度  $1.1^\circ$  を考慮した。実験結果より、剛体チェイサの時と同様に、初期角速度を持ったチェイサの衝突によりターゲットの回転運動が停止し、衝突後はチェイサ、ターゲットともに並進運動のみとなっていることが分かる。また衝突後のチェイサとターゲットの挙動は、実験とシミュレーションでよく一致していることも確認できる。

次に、図8に各変数の時間履歴を示す。図8(a)および図8(b)はそれぞれチェイサの  $x$  軸方向の速度およびターゲットの  $x$  軸方向の速度、図8(c)はターゲットの角速度、図8(d)は  $x$  軸方向の接触力の時間履歴を示している。ここでも、速度および角速度は慣性座標系、接触力はチェイサ座標系にてそれぞれ定義される。

まず、図8(a), 8(b)より、チェイサとターゲットの速度履歴が接触時に急激に変化しており、いずれも  $x$  軸方向速度に運動が



(a) Without compliant wrist (b) With compliant wrist  
Fig. 6 Snapshots of rotation control experiment and simulation

集約されることが確認された。また、ターゲットの角速度については、図 8(c) より、衝突後に  $0 \text{ rad}$  となることが確認できる。これは、衝突時の角運動量交換により、チェイサとターゲットが有していた角運動量が相殺できたことが主因である。併せて、チェイサ角速度も  $0 \text{ rad}$  となっていたことから、チェイサが手首コンプライアンス機構を有する場合についても、導出した接触位置条件  $r_d$  により定義された相対角度制御の妥当性が検証できたといえる。さらに、図 8(d) より、 $x$  軸方向の接触力ピークは  $-6.7 \text{ N}$ 、接触時間はおよそ  $191 \text{ ms}$  であった。剛体チェイサと比較すると、ピークが大幅に低減し、接触時間も長くなっていることが確認できる。以上の結果については、実験結果とシミュレーション結果との比較において整合しており、チェイサが手首コンプライアンス機構を有する場合についても、数学モデルによって接触力や並進・回転運動の関係が適切に表現できることが確認できた。

以上より、手首コンプライアンス機構を搭載したチェイサとターゲットの衝突について、衝突前のターゲットの運動情報から、理論的に導出した接触位置条件を用いてターゲットの回転運動を停止させることができることが確認できた。

## 5 結 論

本稿では、剛体接触および手首コンプライアンスを有するチェイサとターゲットの二次元微小重力下で接触制御問題について、タンプリング衛星の捕獲を想定した相対角速度制御のための接触位置条件を導出し、実験とシミュレーションにより、その妥当性を検証した。今後は、多リンクアームを搭載したチェイサによるターゲットの回転制御への拡張を進めていく予定である。

## References

- [1] K. Yoshida, et al., "Dynamics, Control, and Impedance Matching for Robotic Capture of a Non-Cooperative Satellite", *Adv. Robot.*, vol. 18, no. 2, pp. 175-198, 2004.
- [2] N. Uyama, H. Nakanishi, K. Nagaoka, and K. Yoshida, "Impedance-Based Contact Control of a Free-Flying Space Robot with a Compliant Wrist for Non-Cooperative Satellite Capture", *Proc. 2012 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intel. Rob. Syst.*, pp. 4477-4482, 2012.
- [3] 藤井祐輔, 平野大地, 永岡健司, 吉田和哉, "手首コンプライアンスを有する宇宙ロボットにおける反発係数制御の実験的検証", 第 14 回計測自動制御学会 SI 部門講演会講演論文集, pp. 1510-1515, 2013.
- [4] S. Nishida, and S. Kawamoto, "Dynamical Simulations for Space Debris Capture", *Proc. SICE Annu. Conf. 2011*, pp. 2283-2286, 2011.
- [5] 小林明誉, 永岡健司, 吉田和哉, "軌道上サービスロボットのための回転を含む二次元衝突実験に基づく接触力学", 第 58 回宇宙科学技術連合講演会講演集, # 3H01, 2014.

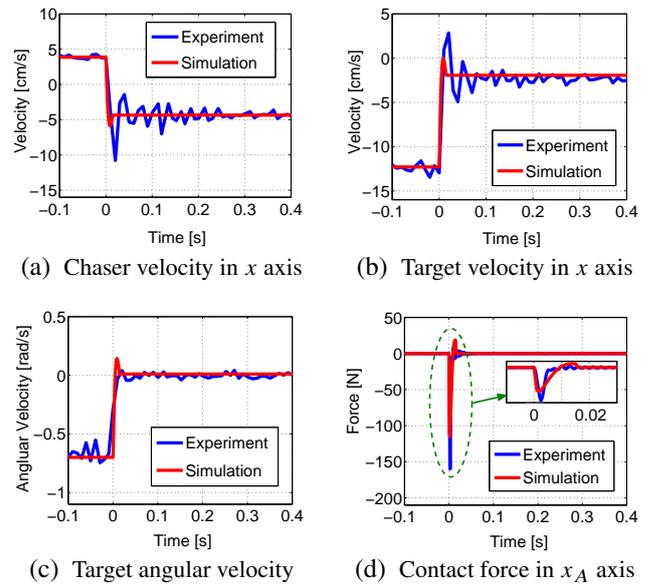


Fig. 7 Time histories of experimental result: rotation control of target by a chaser w/o compliant wrist

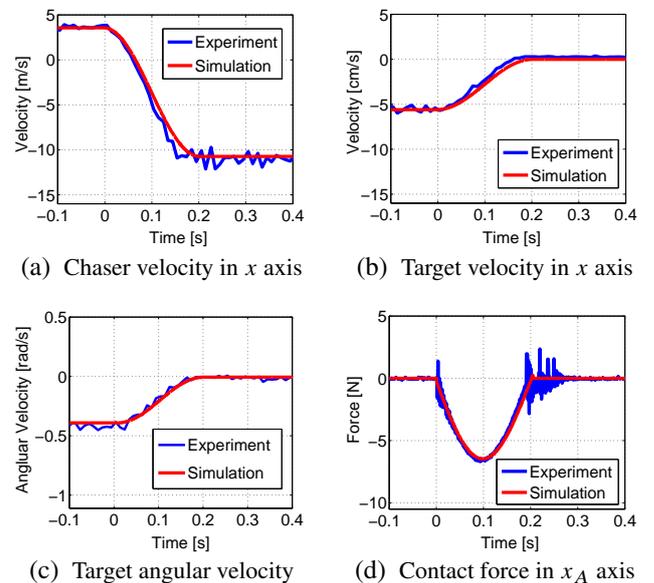


Fig. 8 Time histories of experimental result: rotation control of target by a chaser w/ compliant wrist

- [6] T. Akima, S. Tarao, and M. Uchiyama, "Hybrid Micro-Gravity Simulator Consisting of a High-speed Parallel Robot", *Proc. 1999 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 901-906, 1999.
- [7] R. Takahashi, et al., "Hybrid Simulation of a Dual-Arm Space Robot Colliding with a Floating Object", *Proc. 2008 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 1201-1206, 2008.
- [8] T. Boge, T. Wimmer, O. Ma, and M. Zebenay, "EPOS -A Robotics-Based Hardware-in-the-Loop Simulator for Simulating Satellite RvD Operations", *Proc. 10th Int. Symp. Artif. Intel., Robot. Automat. in Space*, 2010.
- [9] I. Rekleitis, et al., "Autonomous Capture of a Tumbling Satellite", *J. Field Robot.*, vol. 24, no. 4, pp. 275-296, 2007.
- [10] R. M. Brach, "Rigid Body Collisions", *ASME J. Appl. Mech.*, vol. 56, pp. 133-138, 1989.
- [11] R. M. Brach, *Mechanical Impact Dynamics: Rigid Body Collisions*, John & Wiley Sons, 1991.
- [12] G. Gilardi, and I. Sharf, "Literature Survey of Contact Dynamics Modeling", *Mech. Mach. Theor.*, vol. 37, no. 10, pp. 1213-1239, 2002.