

# フリーフライング宇宙ロボットのコンタクトダイナミクスと 多指グリッパによる衛星捕獲の検討

## Contact Dynamics of Free-Flying Space Robots and Satellite Capture by an Articulated Gripper

吉田 和哉, 中西 洋喜, 色部 暁義

Kazuya Yoshida, Hiroki Nakanishi, Akiyoshi Irobe

東北大学

Tohoku University

キーワード : 衛星捕獲 (Satellite Servicing), 摩擦接触 (Frictional Contact), くっつきとすべり (Stick-Slip), 多関節グリッパ (Articulated Gripper) 包み込み把握 (Envelope Grasp)

連絡先 : 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01 東北大学大学院 航空宇宙工学科専攻  
吉田 和哉, Tel.: (022)217-6992, Fax.: (022)217-6992, E-mail: yoshida@astro.mech.tohoku.ac.jp

### 1. まえがき

軌道上で故障したり, 寿命を向かえた衛星を安全に捕獲する技術が求められている. 1997 年に打ち上げられた宇宙開発事業団の技術試験衛星 VII 型 (ETS-VII)<sup>1)</sup> は, 世界初のロボット実験衛星であり, ランデブ・ドッキングや, ロボットアームによる専用フィクスチャの把持などの軌道上実験が行われた. しかしながら, 実用的な局面を想定すると, ターゲット衛星は姿勢制御を失い, いわゆるタンブリングという不安定な運動をしているかもしれない. このような状況でも, 確実な捕獲を行うためには, 相対位置・速度の誤差 (ミスアライメント) に対して頑健な把持方法の開発と, そのような接触時に発生する力や運動を理解するためのシミュレーション法の確立が求められている.

本稿では, 多関節の指を用いて対象物を把持す

る問題を取り上げ, 把持の力学シミュレーションの手法について述べる. ついで, シンプルな機構で確実な把持を行うグリッパーの試作例, シミュレーション例を紹介し, 衛星捕獲の可能性について検討する.

### 2. コンタクトダイナミクスのモデル化と把持の力学シミュレーション

ここでは, 接触点に摩擦を伴うコンタクトダイナミクス (接触の力学) を定式化し, ロボットハンドによる握りや操りの力学から, 宇宙ロボットによる軌道上での衛星捕獲までを幅広く模擬することのできる, 汎用的な力学シミュレーションについて検討する.

多指ハンドが一つの対象物を把持するケースを

考えてみても、接触点は複数存在し、接触点の位置は刻々と変化し、すべりが生じる場合やくいつきが起こるなど、非常に複雑な現象をシミュレートしなければならない。指先把持の場合は接触点の数はさほど多くないが、包み込み把握の場合は、指先以外にも多くの接触点を生じ、接触点の移動を考慮しなければならない。しかしながら、そこに働いている力学モデルは、原理的には決して特殊なものではない。

そこでここでは、包み込み把握<sup>2)</sup>?)に重点を置き、数値シミュレーションを行いうる実用的な方法を検討する。完全剛体系を仮定して動力学を解析的に解こうとすると、摩擦接触を含む場合には、順動力学解の存在と唯一性を示すことが困難になることが知られている。そのような場合、接触点にコンプライアンスと微小変形を導入し、作用力を explicit に取り扱う方法が有望である。

指の運動方程式の一般系は以下のように書くことができ、

$$H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = \tau + J^T F \quad (1)$$

シミュレーションとは、初期値を与えて以下の順動力学問題を解くことである。

$$\ddot{q} = H(q)^{-1} \{ \tau + J^T F - h(q, \dot{q}) \} \quad (2)$$

ここで、 $q$  は関節変数、 $\tau$  は関節トルク、 $F$  は指に作用する力である。指先把持の場合には、 $F$  の作用点は指先に限定され、行列  $J$  は指先に関するヤコビ行列となる。しかし包み込み把握の場合には、作用点は指先に限らず、 $J$  の形をきちんと求めるのは困難なように思われる。しかしながら、Recursive Newton-Eulre 法的に各リンクに作用する力を順次数値的に求めてゆく方法をとるならば、それぞれのリンクに作用する力ベクトルと作用点の位置がわかれば、計算に困ることはない。

指への作用力については、各接触点は力が加わることにより微小変形し、接線方向には「すべ

り」もしくは「くいつき」の現象が生じると仮定する。微小変形については、剛性・粘性パラメータを適切に仮定することにより、接触力、把持力が評価できると仮定する。また、すべりとくいつきの力学現象 (Stick-Slip) については、最大静止摩擦係数、動摩擦係数を仮定することにより評価可能であるとする。以上の前提のもとに力学モデルを構築すると、単純なアルゴリズムによって、把持のダイナミクスの数値シミュレーションが可能となる。

なお、Song らの最近の論文<sup>3)</sup>では、同様に大域的な剛体と微小変形に基づくシミュレーション法が示されているが、singular perturbation theory や linear complementarity problem などのややこしい方法を採用している。Lagrange 法的に拘束力を解こうとしているところに複雑さは起因していると考えられるが、筆者はこのようなややこしい解析は不要と考える。

## 2.1 摩擦接触のモデル

摩擦をともなった接触が生じている状況において、接触点のローカルな法線方向と接線方向に分けて、作用力を解析する。

## 2.2 微小変形モデル

Fig. 1 のように 2 つの物体 A,B が接触している点では、互いの共通法線方向に必ず微小な変形が生じていると仮定する。この変位に対する復元力として、法線方向に接触力が発生する。現実的には A,B の両方に変形が生じるが、接触状態が維持されている限り、A に生じる力も B に生じる力も同じなので、ここでは変位が大きい方 (剛性が低い方) で評価する。変位  $x_n$  と発生力  $f_n$  との関係は、一般に次式のように書くことができる。

$$f_n = Kx_n^p + D\dot{x}_n^q \quad (3)$$

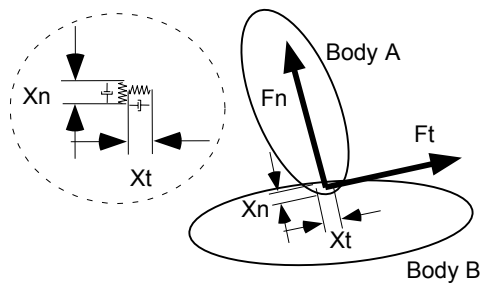


Fig. 1 ふたつの物体の接触

ここで、 $K, D$  はそれぞれ剛性、粘性係数である。  
 $p = q = 1$  とすると、線形粘弾性モデルとなる。

### 2.3 剛性、粘性の設定

接触点の個々について厳密な剛性、粘性を設定することは、現実問題として取り扱い難い。しかしながら、指の表面がやわらかい、関節にコンプライアンスがある、把持対象物が柔らかい、など、系のいずれかの部分に剛性が低い部分があると、その柔らかい部分のダイナミクスが支配的となり、他の固い部分の剛性が多少不正確でもシミュレーションに影響を与えないことがわかっている。よって、現実的には、十分に固いとみなしてよい部分については、柔らかい部分の 10~100 倍の剛性と減衰係数がほぼ 1 となるような粘性係数を設定すればよい。一方で、柔らかい部分の剛性・粘性は、可能な限り正確にモデル化しなければならない。

### 2.4 衝撃力の評価

上に示した変形モデルに基づいた接触力を用いて、系のダイナミクスを解くと、衝撃的な接触力も必然的に評価される。よって、運動量・力積と反発係数を用いた衝撃の評価は不要であり、多くの場合不都合でさえある。たとえば、Fig. 2 は、接触面は剛であるが、背後にコンプライアントな部分がある機械システムが、剛な壁に衝突する場合を示している。このようなケースでは、接触時

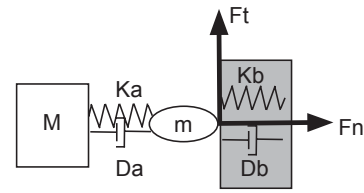


Fig. 2 コンプライアンスを含む機械システムの剛体壁への衝突

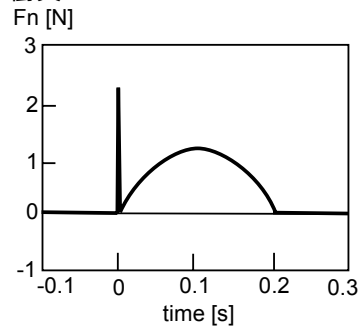


Fig. 3 コンプライアントな要素を含む系の衝撃力のプロフィール

間が無限小にはならないので、運動量・力積と反発係数に基づく衝撃力評価はできない。このときの現象を、変形モデルを用いて評価した接触力の概形を図 3 に示す。同図で時刻  $t = 0$  に接触が生じている。接触の瞬間に、剛性が高い部分に起因して、高い周波数の第 1 撃が生じている。この周波数は、 $m$  と  $K_b$  によって定まる。次いで、背後のバネがゆっくりと変形し約 0.2 秒間接触状態が維持される。このゆるやかな動きには  $M$  と  $K_a$  が支配的である。

### 2.5 Stick-Slip 摩擦モデル

接触点の接線方向には、運動を妨げる方向に摩擦力が作用する。摩擦による Stick-Slip の現象を以下のようにモデル化する。

I. 接触開始から接触力が最大静止摩擦力  $\mu_{max} f_n$  を越えるまで (Stick 状態)

$$f_t = K_t x_t^p + D_t \dot{x}_t^q \quad (4)$$

接線方向の微小変形量に応じた接触力を生じる．  
 II. ひとたび最大静止摩擦力  $\mu_{max}f_n$  を越えたあと  
 ( Slip 状態 )

$$f_t = \mu f_n \quad (5)$$

クーロン摩擦力が作用する．ここで  $\mu$  は動摩擦係数である．なお，接線方向の速度がゼロになった時点で，状態 I に戻る．

### 3. 把持の数値シミュレーション

数値シミュレーションは，当研究室でこれまでに開発を進めてきた MATLAB Toolbox である SpaceDyn<sup>4)</sup> をベースにして開発した．Fig. 3 に示すようなモデルを考え，手のひらを Reference Body として，そこに複数の多節の指が取り付けられているモデルを考える．

#### 3.1 接触の検出

各指と把持対象物体との接触状況は，それぞれのジオメトリモデルの干渉チェックによって検出する．指と対象物，あるいは指同士に干渉がある場合，そのめり込み量を変形量として，(3)～(5)式に示した法線方向および接線方向の接触力を評価する．

干渉チェックは，すべての表面を微小平面に分割近似したジオメトリモデルを使って行うことが理想的であるが，計算量が膨大となってしまうので，ここでは，指を構成する各リンクごとに数点のチェックポイントを設け，把持対象物体を近似する幾何学的表面の方程式との距離を計算することによって検出を行う．

#### 3.2 動力学計算のアルゴリズム

動力学の計算は，各チェックポイントの接触力を評価した上で，各指ごとに Recursive Newton-Euler 法のアルゴリズムに従って行う．物体を把持している状態では，力学的な閉ループ構造が構

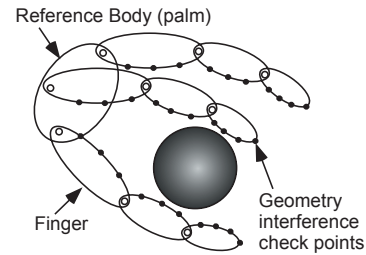


Fig. 4 ハンドのシミュレーションモデル

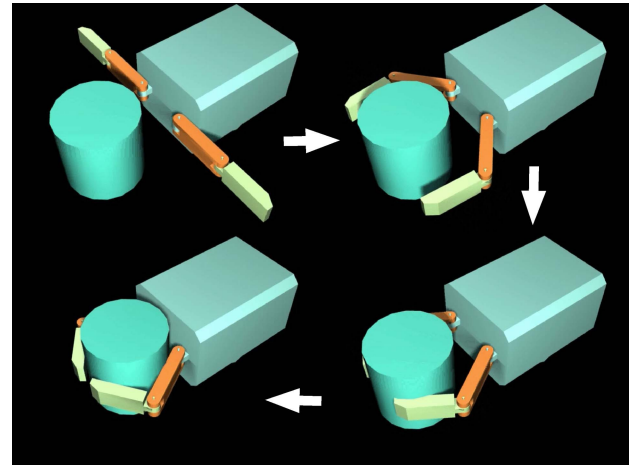


Fig. 5 包み込み把握のシミュレーション例

成されるが，閉ループを幾何学的拘束として捉えるのではなく，上述してきたように全て接触力を使って評価している．よって，常に開ループ構造の計算アルゴリズムで対応可能であり，ループ構造を動的に変化させるアルゴリズム<sup>5)</sup>は必要としない．

#### 3.3 シミュレーション例

Fig.4 にグリッパ - のシミュレーション例を示す．2関節2リンクグリッパ - が閉じ，円柱形の対象物を把持して，最終的に安定的な包み込み把握にいたる様子がシミュレートされている．

## 4. 適応的多関節グリッパ - の試作

以上の考察に基づき，適応的な包み込み把握を行うことができる極限作業用グリッパ - を試作・



開発した．ここで極限作業とは，水中作業において水底より対象物を拾い上げる場合や，軌道上において宇宙空間に浮遊する対象物を把握する作業を想定する．これらの作業では，指先による精緻なハンドリングよりも，対象物を逃さず確実に把握することが求められ，よって，指先での器用なマニピュレーションは必要としない．むしろ，着実に包み込み把握できることが重要である．ハンドの位置決め誤差や，対象物の不定な形状に対するロバスト性，機構がシンプルであること，複雑な制御系を必要としないこと，少ない数のアクチュエータでも駆動可能なこと，などの条件が優先される．

多関節フィンガーをワイヤー・プーリーを使った機構で連結し，把握用，開放用のわずか2個のモーターを使って適応的な把握を可能とする Soft Gripper がこれまでに開発されている<sup>6)</sup>．不定形状の対象物を適応的に包み込み把握するためには，各関節のトルク配分を指先から根元にいたるまで2次関数的に大きくなるように設定してやるとよいことが指摘され，Soft Gripper では，プーリー径を変えることによって，機構的に理想的な把握トルク配分を行っている．

#### 4.1 TAKO Gripper

Soft Gripper の考え方をそのまま適用し，水中作業用に試作したグリッパ - (TAKO Gripper) を Fig.5 に示す．このグリッパ - では，モータを1個としその正転・逆転によって指の開閉を行う．海中での強度と信頼性，耐腐食性を得るため，金属ワイヤーの代わりにプラスチックベルトを用いている．水中ではモーターの防水対策がやっかいであるが，複数の関節を機構的に連動させることによって，最小個数のモーターで適応的な包み込み把握が可能であり ( Fig.6 参照 )，水中移動ロボットに搭載して水底よりボトル状の対象物を拾い上げることに成功した．

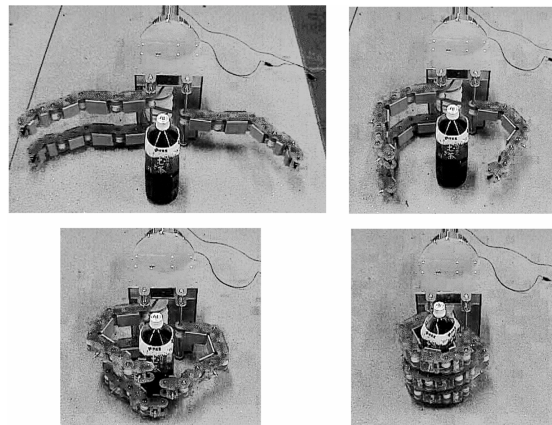


Fig. 6 水中作業用多関節グリッパ - TAKO Gripper

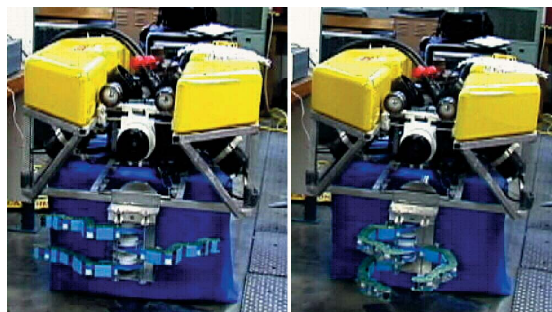


Fig. 7 水中ロボット ROV に装着した TAKO Gripper

TAKO Gripper による実験の結果，同型のグリッパ - は対象物が指の付け根 ( 手のひら ) 付近にある場合には，確実な把持が可能であり，たとえば手のひら上にタッチセンサを置き接触を検知したら指を閉じるという，握り反射として機能させる場合には最適であるということが出来る．しかしながら，閉じる過程の指の形状 ( 関節角 ) を

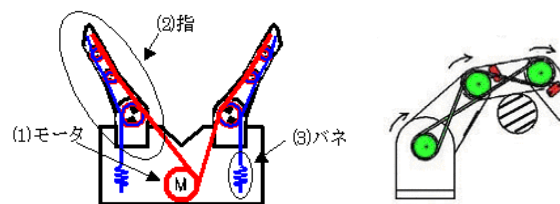


Fig. 8 Space Gripper の機構

一意に指定することができないので，中心からはずれた位置に置かれた対象物を取り逃がす現象も観察された．

## 4.2 Space Gripper

TAKO Gripper で明らかとなった欠点を改善し，対象物に触れるまでは角度を規定した指の閉動作が可能であり，対象物に触れた後には Soft Gripper と同様な適応的等圧把握を可能とするグリッパを試作した．これは，宇宙作業を想定したグリッパとし Space Gripper と呼ぶことにする．

Space Gripper の機構的な構成を Fig.7 に示す．角度指定の閉動作と等圧の握り動作の両者を機構的に実現するために，指が対象物に触れていない無負荷状態では，同図右に示すように，各関節を，たすきがけにわたしたワイヤーによって同期回転させ，対象物に触れて負荷がかかると，同期をとっていたプーリーと指をつなぐプランジャーがはずれ，等圧把持をするためのワイヤー機構が有効になる仕掛けを組み込んだ<sup>7)</sup>．この動作は，指をとにかく閉じればよいとする握り反射よりは多少成長し，各関節を意図的に制御できるレベルに進歩した握り把握ということができよう．なお，類似のメカニズムとして Barrett Hand では，TorqueSwitch と名づけられたクラッチ機構によって，指に加わる負荷に応じて関節運動を切り替え包み込み把握を実現している<sup>8)</sup>．

試作した Space Gripper による把握の例を Fig.8 ~ 10 に示す．Space Gripper では，指の全長で規格化した把握可能領域は，前作の TAKO Gripper よりも広くとることができ，指がスイープする領域内に対象物が置かれれば，ほとんどのケースで安定的な包み込み把握が可能であることが確認された．光学的な近接センサと組み合わせることにより，触覚刺激無しで，ラフな位置決めのみで対象物の把握が可能である．Fig.10 はハンドレール型のフィクスチャを把握するケースを示しており，

このような把持メカニズムは，衛星同士のドッキング機構への応用も考えられる．

## 5. あとがき

本稿では，フリーフライング宇宙ロボットのコンタクトダイナミクスと多指グリッパによる衛星捕獲について検討した．

## 参考文献

- 1) M. Oda et al, "ETS-VII, Space Robot In-Orbit Experiment Satellite," *Proc. 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.739-744, 1996.
- 2) 吉川，永井：“多指ハンドの操り力と握力”，計測自動制御学会論文集，vol.23, no.11, pp.90-97, 1987. bibitem 小俣小俣，永田：“多指ハンドによるパワーグラスの力学的特性”，日本ロボット学会誌，vol.13, no.4, pp.525-531, 1995.
- 3) P. Song, P. Kraus, V. Kumar, P. Dupont: "Analysis of Rigid-Body Dynamic Models for Simulation of Systems With Frictional Contacts," *Trans. ASME, J. of Applied Mechanics*, vol.68, pp.118-128, Jan. 2001.
- 4) Kazuya Yoshida: "The SpaceDyn: a MATLAB Toolbox for Space and Mobile Robots," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.12, no.4, pp.411-416, 2000.
- 5) 中村，山根，永嶋：“構造変化を伴うリンク系の動力学計算法とヒューマンフィギュアの運動計算”，日本ロボット学会誌，vol.16, no.8, pp.124-131, 1998.
- 6) 広瀬茂男：生物機械工学，工業調査会，1987．
- 7) 寺崎，町田，吉田，鬼頭，安田，日浦：“衛星捕獲用グリッパの開発”，第19回日本ロボット学会学術講演会講演論文集，pp.1137-1138, 2001.
- 8) W. T. Townsend: "Description of a Dexterous Robotic Grasper", *日本ロボット学会誌*，vol.18, no.6, pp.798-801, 2000.

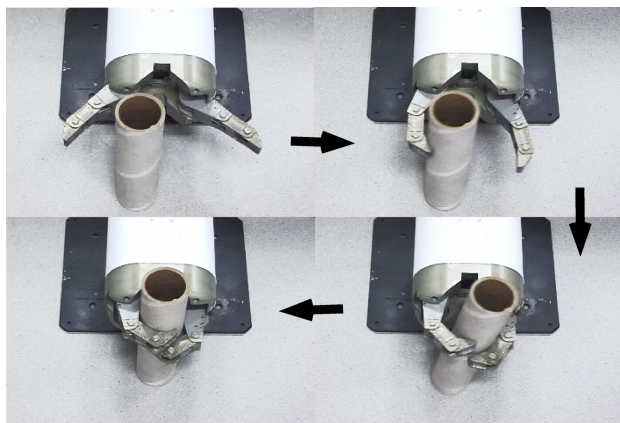


Fig. 9 Space Gripper による円柱状対象物の把握シーケンス

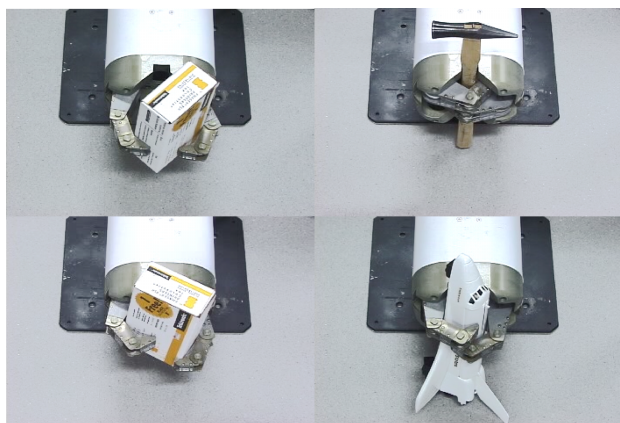


Fig. 10 Space Gripper による任意形状対象物の把握

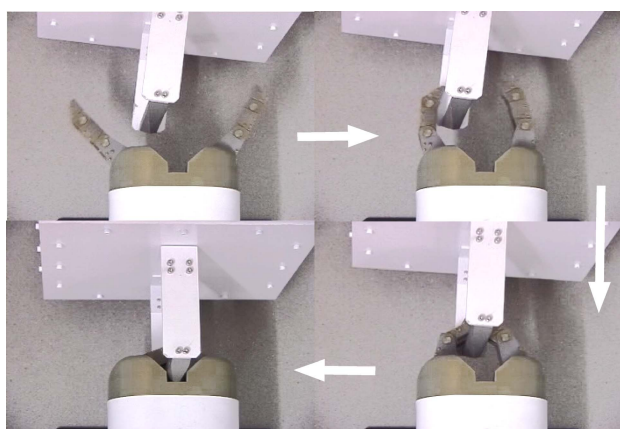


Fig. 11 Space Gripper によるハンドレール型フィクスチャの把握