双腕フレキシブルマニピュレータの対象物捕獲作業における 目標保持力の短時間での実現*

宮 部 友 博^{*1}, 山 野 光 裕^{*2}
近 野 敦^{*1}, 内 山 勝^{*1}

Realization of a Quick and Stable Capturing Task with a Two-Arm Flexible Manipulator

Tomohiro MIYABE^{*3}, Mitsuhiro YAMANO,
Atsushi KONNO and Masaru UCHIYAMA

^{*3} Department of Aeronautics and Space Engineering, Tohoku University,
01 Aoba-yama, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

This paper discusses an object capturing task with a two-arm flexible manipulator. To realize a stable capture with no slips at the end-effectors on the object surface, the internal force being developed in the object needs to rise quickly. For this purpose, the relationship between the end-effectors' approach velocities to the object and the internal force during the capture is analyzed with a simple mass-damper-spring model for the two-arm manipulator and the object system. Furthermore, a method for changing the control modes is proposed considering the resultant mechanical compliances at the tips of the arms so that the rise time of the internal force is reduced. The effectiveness of this method is verified with experiments.

Key Words: Manipulator, Flexible Structure, Robot, Capturing Task, Dual Arm, Cooperative Control, Mechanical Compliance

1. は じ め に

現在, 通信・観測などの目的のために打ち上げられた多数の人工衛星が軌道上を周回している. このような人工衛星を効率よく維持するためには, 軌道上で修理や燃料の補給を行う必要がある. しかし, 宇宙飛行士による宇宙船外活動は大変な危険を伴う上に, 宇宙空間では, 常駐できる宇宙飛行士の人数は限定されているため, 恒久的な人手不足が懸念されている. したがって, これらの作業においては自動化・ロボット化により宇宙飛行士の負担を軽減することが期待されている. すでに, 軌道上での衛星捕獲実験⁽¹⁾や, 地上での検証用テストベッドの開発⁽²⁾などが報告されている.

一方, 宇宙用マニピュレータは, 打ち上げ時のコストを押さえるため, できる限り軽量であることが望ましいとされる. 軽量化は剛性の低下をもたらすため, フレキシブルマニピュレータとしての考慮が必要となってくる. フレキシブルマニピュレータに関しては, モデリングを初めとして, 様々な面から数多くの研究が

行われてきた⁽³⁾.

マニピュレータを用いて対象物を捕獲する場合には, 接触の直前・直後が最も重要な段階となる. このため, 剛体マニピュレータの衝突制御に関しては, これまでに多くの研究がなされてきた⁽⁴⁾. しかし, フレキシブルマニピュレータの衝突制御に関する研究はほとんど報告されていない. Bookらは, 1リンクフレキシブルマニピュレータの接触作業に関する解析を行ったが, 最終的には, 非常に低速度でアームの先端を環境と接触させることで, 衝撃力の発生を防ぐことにしている⁽⁵⁾. また, 森田らは1リンクフレキシブルアームの最適接近速度を求めているが, 環境面もある程度の弾性を持ち, はね返りが起こらない場合を想定しているため, 適用できる範囲が限定される⁽⁶⁾.

本論文では, 双腕フレキシブルマニピュレータを用いた対象物の捕獲作業に関して議論を行う. 最初に, ばね・質量・ダンパ系モデルを用いたシミュレーションを行い, フレキシブルマニピュレータを用いて対象物の捕獲作業を行う場合において, 接触時の速度が保持力の応答に与える影響を明らかにする. 次に, フレキシブルマニピュレータの持つ機械的コンプライアンスを考慮することで, 保持力の立ち上がり時間を短縮

* 原稿受付 2001年12月19日.

^{*1} 正員, 東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01).

^{*2} 正員, 山形大学工学部(〒992-8510 米沢市城南4-3-16).
E-mail: miyabe@space.mech.tohoku.ac.jp

Fig. 1 Mass-damper-spring model for the two-arm manipulator and the object system.

させる手法を提案する。最後に、3次元双腕フレキシブルマニピュレータを用いた対象物捕獲実験を行い、本手法の有効性を示す。

2. 捕獲作業の解析

マニピュレータを用いて対象物の捕獲作業を行う場合、対象物表面とエンドエフェクタ間に滑りなどが発生することなく、確実に捕獲作業を行うためには、接触後、短時間で目標保持力を実現する必要がある。

剛体マニピュレータの接触作業を解析する際、エンドエフェクタの運動を1次元に限定した、図1(a)のようなばね・質量・ダンパモデルがよく用いられる。北垣らは、単腕剛体マニピュレータの接触作業時に、対象物への接近速度を最適化することで、過大な衝撃力を発生させることなく、目標接触力を短時間で実現させている⁽⁴⁾。

これに対して、双腕フレキシブルマニピュレータによる対象物捕獲作業の解析では、アームの柔軟性を考慮した図1(b)のようなモデルが必要となる。このモデルでは、各腕の速度指令の偏差に応じた力 u_i ($i = 1, 2$) がシステムへ入力され、フレキシブルリンクを通じてエンドエフェクタに伝えられる。このモデルを用いて、各腕が保持力を加える方向に互いに接近し、両腕間の相対速度が v_0 の状態を対象物に接触した後、双腕協調制御則⁽⁷⁾により保持力が制御される場合において、接触時の速度が保持力の応答に与える影響について考察を行う。

シミュレーションにはMathWorks社製技術計算用ソフトウェアMATLABを使用した。積分時間のきざみ幅は0.1 [ms]とし、シミュレーション内でのサーボのサンプリング周波数は128 [Hz]とした。各パラメータは、4章での実験に用いる実験機ADAM (Aerospace

Table 1 Simulation parameters.

Mass of object	m_0	1.00 [kg]
Mass of end-effector	m_{Ri}	5.47 [kg]
Damping of end-effector	c_{Ri}	200 [Ns/m]
Spring of end-effector	k_{Ri}	60000 [N/m]
Mass of flexible link	m_{Fi}	4.26 [kg]
Damping of flexible link	c_{Fi}	1.00 [Ns/m]
Spring of flexible link	k_{Fi}	2830 [N/m]

(a) Internal force (b) Deflection of arm 2
With approach velocity $v_0 = 0.10$ [m/s]

(c) Internal force (d) Deflection of arm 2
With approach velocity $v_0 = 0.25$ [m/s]

Fig. 2 Simulation results for different approach velocities.

Dual-Arm Manipulator) を参考にして決定した。シミュレーションに用いたパラメータの値を表1に示す。

シミュレーション結果を図2に示す。保持力の応答を図2(a), (c)に、アーム2のリンクの弾性変位の応答を図2(b), (d)に示す。アーム1の弾性変位については、アーム2の正負を反転させたものとはほぼ同じであったため省略した。シミュレーション結果より、対象物に対するエンドエフェクタの接近速度を変化させても、接触した瞬間の衝撃力のみが変化し、目標保持力に達するまでの時間には変化がみられないことが分かる。また、保持力の応答と、アームの弾性変位の応答との間に強い相関性が見られる。これは、フレキシブルマニピュレータでは、全体の柔軟性に対してリンクの柔軟性が支配的であり、力制御を行ったときの保持力の応答は、リンクの柔軟性に大きく依存するためである。

3. 機械的コンプライアンスを考慮した捕獲作業

剛体マニピュレータを用いて捕獲作業を行う際には、系全体の剛性が高いため、適切な接近速度で接触が行われれば、すぐに頑強な把持を実現することができる。

Fig. 3 Sequence of the capturing task.

しかし、大きな機械的コンプライアンスを有するフレキシブルマニピュレータを用いて捕獲作業を行う場合には、接近速度を変更することでは、保持力を短時間で目標力に追従させることはできないことが2章より明らかになった。

保持力の応答を改善する最も簡単な方法は、力フィードバックのゲインを高く設定することであるが、エンドエフェクタが拘束された状態にあるフレキシブルマニピュレータの力フィードバックのゲインを必要以上に高く設定すると、システムが不安定になる恐れがある⁽⁵⁾⁽⁸⁾。

一般に、マニピュレータの接触作業においては、接触の瞬間に位置制御から力制御への切り換えが行われる。しかし、2章の結果が示すように、保持力の応答には、リンクの機械的コンプライアンスが強く関与しているため、接触の瞬間ではなく、目標保持力と釣り合う弾性変位が生じた瞬間に制御則を切り換えるという発想が生まれてくる。

この発想に基づき、マニピュレータの機械的コンプライアンスを考慮した対象物捕獲手法を提案する。提案する手法での作業の流れを図3に示す。提案する手法は、以下の三つの段階に分かれる。

3.1 第1段階 各腕のエンドエフェクタが対象物に接触するまでを第1段階とする。本段階開始時には、各腕のエンドエフェクタに取り付けられたカメラ

やレーザ式変位センサによって、各腕のエンドエフェクタから対象物の表面までの距離が測定できる距離に、両腕は配置されているとする。

本論文で提案する手法では、この非接触の段階から、各腕のエンドエフェクタに、仮想ステッキ⁽⁹⁾が取り付けられていると考え、両腕の運動を制御するために双腕協調制御則を適用する⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。本来仮想ステッキは、双腕マニピュレータが物体を把持した状態において、対象物に作用する保持力を定義するために考え出された概念であり、各腕の把持位置から対象物座標系 Σ_a の原点に向かうベクトルとして定義されるが、ここでは、非接触状態の双腕マニピュレータの運動を記述するために拡張する。

各腕のエンドエフェクタの位置と姿勢がエンコーダなどの内部センサから、また対象物との距離が測距センサにより測定されるならば、図3(a)に示すような非接触状態においても、保持力を加える方向の対象物の全長を推定することができる。そこで、各腕の把持予定位置から対象物の中心と想定される位置に設定された座標系 Σ_a の原点に向かうベクトルを、現在のエンドエフェクタの位置へ平行移動させたものを本論文での仮想ステッキとして定義する。そして、両腕のエンドエフェクタ間ではなく、仮想ステッキの先端間に着目して双腕の相対運動を考えることにする。非接触状態から双腕協調制御を行うことで、接触時、及びこの後の制御の切り換え時における制御指令の変動やリンクの振動を最小限に抑えながら統一的に作業を記述することができる。

両腕のエンドエフェクタは、対象物の表面から等距離に配置された後、保持力を加える方向に関して互いに対象物に接近し、両腕間にある相対速度が生じている状態で、同時に対象物に接触する。

3.2 第2段階 接触から制御則を切り換えるまでを第2段階とする。図3(c)に示すように、フレキシブルアームのモデルと剛体アームのモデルとの違いから、保持力を対象物に加える場合に、仮想ステッキの両先端間に、相対変位 ${}^a\Delta p_r$ が発生していると考える。

$$\Delta e_e = -(e_{e1} - e_{e2}) \quad (1)$$

$${}^a\Delta p_r = {}^aR_0 B_s \Delta e_e \quad (2)$$

ここで、 B_s はロール・ピッチ・ヨー角で表された両腕間の姿勢角の差を回転ベクトルに変換する行列、 aR_0 は基準座標系から対象物座標系への座標変換行列である。 e_{ei} は、各腕の弾性変位ベクトル e_i より求めたエンドエフェクタの位置に現れる位置偏差を表す。

両腕のリンクに弾性変形が生じていれば、それに相

Fig. 4 Overview of the experimental dual-arm flexible manipulator system ADAM.

応する保持力が対象物に作用していると考えることができる。そこで、あらかじめ目標保持力とエンドエフェクタの位置に現れる機械的コンプライアンス⁽¹²⁾から目標保持力に釣り合う相対変位を求めておき、接触後も Δp_r によって両腕間の相対運動が表されるとして、位置制御を継続し、接触時と同じ目標相対速度を与え続けることでリンクの弾性変形を迅速に促す。そして、相対変位が目標値に達した時点で位置制御から力制御に切り換えることで、保持力の立ち上がり時間を短縮させることが可能となる。

なお、振動抑制制御は、リンクの弾性変形を抑制する働きがあるため、本段階では適用しない⁽¹¹⁾。

3.3 第3段階 双腕協調制御則により、対象物の位置と、対象物に作用する保持力が制御される。この際、改めて仮想ステッキが定義され、振動抑制制御に関しても適用を再開する。

4. 対象物捕獲作業実験

4.1 実験機 ADAM 3章で提案した手法の有効性を検証するために、図4に示した実験機 ADAM を用いて、対象物の捕獲作業実験を行う。

ADAM は各腕につき2フレキシブルリンク7ジョイントを持つ双腕フレキシブルマニピュレータである。モータドライバには速度指令型のものを使用し、位置制御指令 $\dot{\theta}_z$ 、力制御指令 $\dot{\theta}_\eta$ 、振動抑制制御指令 $\dot{\theta}_e$ を足し合わせた $\dot{\theta}_d$ を各関節への制御指令として与える。

$$\dot{\theta}_d = \dot{\theta}_z + \dot{\theta}_\eta + \dot{\theta}_e \quad (3)$$

$$\dot{\theta}_z = J_\theta^+ S B_a \{ \dot{z}_d + K_{zp} (z_d - z) \} \quad (4)$$

$$\dot{\theta}_\eta = \Lambda^{-1} J_\theta^T (E_{12} - S) K_{\eta p} (\eta_d - \eta) \quad (5)$$

$$\dot{\theta}_e = M_{21}^+ M_{22} K_{ev} S_{high} e \quad (6)$$

ここで、 z 、 η はそれぞれ対象物の絶対運動および双腕の相対運動を考えるための、一般化作業位置ベクトル、一般化作業力ベクトルを表す。また、添字 d は各

変数の目標ベクトルであることを示す。 E_n は $n \times n$ の単位行列、 B_a は対象物の姿勢角成分を回転ベクトルに変換する行列、 J_θ^+ 、 J_θ^T はヤコビ行列 J_θ の Moore-Penrose 逆行列と転置行列である。 K_{zp} 、 $K_{\eta p}$ 、 K_{ev} はゲイン行列、 Λ はモータドライバの速度フィードバックゲインを表す。選択行列 S によって位置制御と力制御の切り換えが行われる。また、 S_{high} は両腕の弾性変位ベクトル e に含まれる重力項成分を取り除くためのハイパスフィルタ演算を表す。 M_{21} 、 M_{22} は双腕フレキシブルマニピュレータの慣性行列の一部である。位置と力のハイブリッド制御にはジョイント3を除いた6ジョイントを使用し、振動抑制制御には7ジョイントすべてを用いる。

各リンクのたわみは、リンクに貼り付けられたひずみゲージによって計測される。さらに、各腕のエンドエフェクタに加わる力/モーメントを計測する6軸力覚センサと、エンドエフェクタから対象物までの距離を測定するレーザ式変位センサが各腕のエンドエフェクタに取り付けられている。

制御用コンピュータには、CPU に 700 [MHz] の Pentium III を搭載した IBM PC/AT 互換のパーソナルコンピュータを使用し、OS には VxWorks 5.4 を用いた。各制御則のゲインは、 $K_{zp} = 4.0 E_{12} [s^{-1}]$ 、 $K_{\eta p} = 0.12 E_{12}$ 、 $K_{ev} = 20 E_{14} [s^{-1}]$ とし、サーボのサンプリング周波数は CPU の処理能力と OS の仕様から 128 [Hz]、ハイパスフィルタのカットオフ周波数は 1 [Hz] とした。

4.2 静止対象物捕獲作業実験

4.2.1 実験条件 空中で静止した対象物の捕獲作業実験を行った。捕獲対象物には、質量 0.9 [kg]、寸法 608 [mm]×192 [mm]×182 [mm] の直方体を使用する。対象物は両腕間の中間点に柔軟性を有する糸によって吊され、空中で静止している状態で捕獲作業を行う。両腕は対象物の表面からそれぞれ 40 [mm] 離れた位置から接近する。

接触時の速度に関しては、2章の結果が示すように、速度が速すぎる場合には、大きな衝撃力が発生する上に、バウンドなどの現象が起こるために望ましくない。一方で、速度が遅すぎると作業効率が悪化する。本論文の実験では双方の妥協として、各腕は対象物を挟んで左右対称な姿勢で配置され、対象物に接近する方向における両腕間の相対速度が $v_0 = 0.15$ [m/s] の状態で対象物と接触させることにした。各腕のエンドエフェクタの位置に現れる機械的コンプライアンスは、保持力を加える方向に関してともに 0.351 [mm/N] である。目標保持力は 40 [N] とした。

Fig. 5 Experimentation results for capturing a floating object.

4.2.2 実験結果 実験結果を図 5 に示す。図 5 (a), (b) は、本論文で提案した手法との比較のために、3.2 節で示した第 2 段階を省略し、接触直後に力制御に切り換えた場合に対象物に作用する保持力と、保持力を加える方向のアーム 2 の弾性変位を表す。2 章のシミュレーション結果と同じく、保持力が目標力に達するまでに数秒の時間を要し、保持力の応答と、アームの弾性変位の応答との間に相関性があることが確認できる。

図 5 (c), (d), (e) は提案した手法を用いた際の保持力、保持力を加える方向のアーム 2 の弾性変位、式 (2) より求めた両腕間の相対変位を示す。接触後も制御則を変更せず、目標保持力に釣り合う相対変位が発生した瞬間に制御則を切り換えた。提案した手法を適用することにより、弾性変位の発生を促し、保持力の立ち上がり時間を短縮させることができている。また、制御則を切り換えた直後には、一時的に保持力の応答が振動的になるが、力制御への切り換えと同時に再び振動抑制制御を適用することにより、振動を収束させることができている。

4.3 回転対象物捕獲作業実験 次に、スピン衛星の捕獲作業を想定した回転体の捕獲作業実験を行った。

4.3.1 実験装置 対象物には、質量 0.45 [kg] の円筒を使用する。この回転体は、ボールベアリングに

Fig. 6 Sequence of capturing a spinning object.

よって支えられているため、回転軸回りに自由に回転することができる。宇宙を漂うスピン衛星などの回転体は浮遊しており、その回転ベクトルはカメラなどにより検出する必要がある。しかし、本論文では地上での基礎的な検証実験を行うことを目的としているため、対象物の回転軸を床面に固定し、対象物の回転速度は、回転軸に取り付けられたエンコードから得られる角度情報を微分して求めた。

4.3.2 回転対象物捕獲作業手順 両腕は、角速度 0.465 [rad/s] で回転する対象物に同期するための回転運動を行いながら、同時に保持力を加える方向に相対速度 $v_0 = 0.15$ [m/s] で接近し (図 6 (a)), 接触する (図 6 (b))。作業を簡単化するために、図 6 (c) に示すように、両腕が接触後に左右対称な姿勢に到達した時点で、制御則が切り換わるように初期姿勢などを設定した。制御則の切り換え後、両腕は回転速度を減少させ始める。対象物にすばやく十分な保持力を作用させることができれば、両腕によって対象物の回転運動を減速、停止させることができる (図 6 (d))。

対称な位置に配置された時点で、保持力を加える方向に関する各腕のエンドエフェクタの位置に現れる機械的コンプライアンスは 0.424 [mm/N] であり、相対変位が 33.9 [mm] に達した瞬間に制御則を位置制御から力制御に切り換えた。なお、実験時のゲイン、及びサンプリング周波数などは、静止物体の捕獲作業時と同じとした。

4.3.3 実験結果 捕獲作業の様子を図 7 に、実験結果を図 8 に示す。図 8 (a) は対象物に作用している保持力を表し、図 8 (b) は回転軸に取り付けられたエンコードからの角度情報と、両腕のエンドエフェクタの位置より計算した双腕の姿勢を表す。

対象物が回転運動をしている場合でも、接触後、保持力の立ち上がり時間を短縮させることにより、両腕と対象物の間に発生するすべりが最小限に抑えられ、対象物の捕獲に成功していることが実験結果より分か

Fig. 7 Capturing a spinning object with a two-arm flexible manipulator.

Fig. 8 Spinning object's parameters during the capture.

る。このように、運動量を持っている対象物をフレキシブルマニピュレータを用いて捕獲する場合に、本論文で提案した手法は特に有効である。

なお、接触した瞬間に図 8 (b) の 2 つの回転角度の間に偏差が生じているが、これは、本論文の実験装置には、対象物の回転軸の位置を検出するセンサが備わっていないため、対象物の回転中心と両腕の回転運動の中心を完全に一致させることができず、接触した瞬間に、回転の接線方向に運動量を与えてしまうためである。カメラなどからの情報により、両者の回転中心を一致させ、より滑らかな回転対象物の捕獲作業を実現することは今後の課題の一つである。

5. お わ り に

本論文では、双腕フレキシブルマニピュレータを用いて対象物捕獲作業を行う際に、対象物に作用する保持力の制御に関して議論した。

双腕フレキシブルマニピュレータの捕獲作業に関して、対象物への接近速度と保持力の応答との関係についてモデルを用いた解析を行い、接近速度を変更することだけでは、保持力を短時間で目標力に追従させることができないことを明らかにした。次に、アームの機械的コンプライアンスを考慮することで、目標保持力に釣り合う弾性変位が発生した段階で、制御則を位置制御から力制御に切り換える手法を提案し、実験に

よりその有効性を示した。

文 献

- (1) Inaba, N. and Oda M., Autonomous Satellite Capture by a Space Robot -world first on-orbit experiment on a Japanese Robot Satellite ETS-VII-, *Proc. 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (2000), 1169-1174.
- (2) 渡辺一郎 他, 宇宙ロボット作業評価用テストベッドの開発と衛星捕捉模擬実験, *日本ロボット学会誌*, **16**-7, (1998), 974-984.
- (3) Book, W. J., Maizza-Neto, O. and Whitney, D. E., Feedback Control of Two Beam, Two Joint Systems with Distributed Flexibility, *Trans. AMSE, J. Dyn. Syst. Meas. Control*, **97**-4, (1975), 424-431.
- (4) 北垣高成・内山勝, 外部環境に対するマニピュレータの最適接近速度, *日本ロボット学会誌*, **8**-4, (1990), 413-420.
- (5) Book, W. J. and Kwon, D., Contact Control for Advanced Applications of Light Weight Arms, *J. of Intelligent and Robotic Systems*, **6**, (1992), 121-137.
- (6) 森田良文・大野眞・岡田浩幸・鶴飼裕之・神藤久, 1 リンクフレキシブルアームの力制御における最適接近速度の実験的考察, *電学論*, **118**-1, C (1998), 50-56.
- (7) 山野光裕・金鎮秀・近野敦・内山勝, 3 次元双腕フレキシブルマニピュレータの協調制御実験, *機論*, **66**-649, C (2000), 3063-3068.
- (8) Matsuno, F. and Kasai, S., Modeling and Robust Force Control of Constrained One-Link Flexible Arm, *J. of Robotic Systems*, **15**-8, (1998), 447-464.
- (9) 内山勝・ピエール ドシェ, 両手ロボットの対称型運動学と非マスタスレーブ協調制御, *日本ロボット学会誌*, **7**-1, (1989), 19-30.
- (10) Yamano, M., Konno, A. and Uchiyama, M., Experiments on Capturing a Floating Object by Two Flexible Manipulators, *Proc. 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (2000), 482-487.
- (11) Yamano, M., Konno, A., Uchiyama M. and Miyabe, T., Capturing a Spinning Object by Two Flexible Manipulators, *Proc. 2000 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, (2000), 223-229.
- (12) 小松督・植之原道宏・飯倉省一・三浦宏文・下山勲, 2 リンク柔軟マニピュレータのコンプライアンス制御, *機論*, **56**-530, C (1990), 2642-2648.