



技術解説

宇宙ロボット技術

宮崎 文夫*

Space Robot Technology

Key Words : Orbital Maneuvering Vehicle, Sensory Feedback Control, Motion Estimation

1. はじめに

日本人科学者としてはじめてスペースシャトルに搭乗し、様々な実験をした毛利衛さんの活躍はまだ記憶に新しい。とは言え、このように思っているのは筆者だけで、アポロの月面着陸からすでに20年以上経過し、宇宙環境を映像として提供されることに慣れきった人にはそれほど興味を抱かせなかったかも知れない。確かにテレビ画面に映し出される無重力環境固有の物体の動きなどどれも予想通りではあった。しかし、地上と会話しながらラフないでたちで活動する彼の姿を見ていると、地上の実験室から中継しているのではないかと錯覚するほど身近に感じられ、ときに常識的な判断が覆される状況を目にして宇宙環境の特異さを再確認させられた。宇宙環境については、筆者自身宇宙ロボットを研究の1テーマにしていることもあり、頭の中ではよくわかっているつもりだが、身につかぬものらしい。高いコストと危険性を伴うものの、やはり有人宇宙活動はそれなりに大きな意義を持っているようである。

さて、有人宇宙活動が日常化し、各種衛星が頻繁に打ち上げられるようになると、宇宙にも市場原理による自動化の波が及んでくる。宇宙

飛行士が行う作業支援のためのテレオペレーションロボットをはじめ、衛星へのサービスを提供するロボットシステム、宇宙建造物の組立ロボット、さらには惑星の探査ロボットなどそのニーズは広範囲にわたっている。これらのニーズに対応した宇宙ロボット関連の開発研究はすでに各国で本格的に開始されており、わが国でも宇宙ステーションの日本実験モジュール(JEM: Japanese Experiment Module)に取り付けられるマニピュレータの開発が行われている。これは、宇宙飛行士が近接領域から操作する第一世代のロボットである。一方、衛星サービスロボットなどのように地上から遠隔操作する部分自律型の宇宙ロボットや遠隔操作をほとんど加えない自律型の惑星探査ロボットは次世代のロボットであり、ホットな問題を数多く含んでいる。本稿では、衛星サービスロボットを例にとり、次世代の宇宙ロボットに関する研究の一端を紹介する。

2. 衛星サービスロボット

衛星サービスロボットは、将来の多様な宇宙開発において、地球周回軌道上の施設(各種衛星や宇宙ステーションなど)の建設、保守、点検、修理を行うロボットである。基本的には、図1のように衛星軌道上を自由に飛行する小形宇宙機にマニピュレータや視覚装置が装備されたものである。宇宙という未知要素の多い環境で活動しなければならないことから、これらのロボットは軌道上あるいは地上のオペレータの監視の下に様々な作業を実行することになる(図2参照)。この場合、オペレータの負担とロ

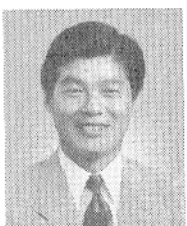
*Fumio MIYAZAKI

1952年8月28日生

昭和50年大阪大学基礎工学部機械工学科卒業

現在、大阪大学基礎工学部機械工学科プラント工学研究室、教授、工学博士、ロボティクス、機械システム工学

TEL 06-844-1151(内線)4505



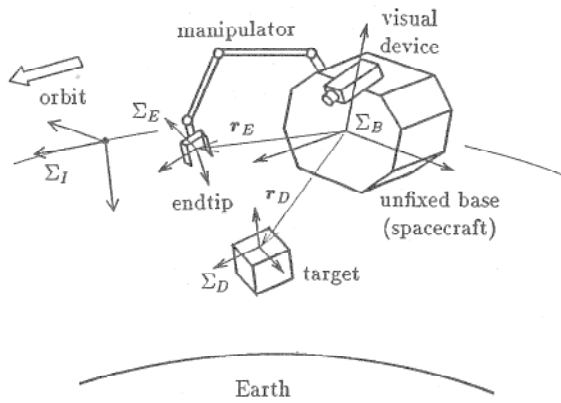


図1 衛星サービスロボット

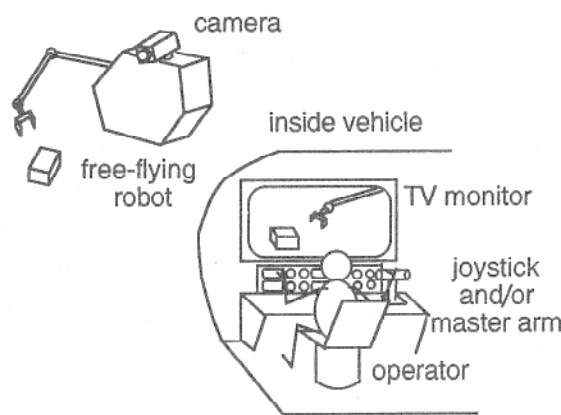


図2 オペレータ監視下での軌道上作業の概念図

ロボットの自律性は相反するから、自律性の高いものほど望ましいことは言うまでもない。また、オペレータから遠く離れた現場で作業するために生じる通信の遅れや作業のモニタリングの難は、ロボットの自律化を不可避的なものにする。

衛星サービスロボットの場合に必需となる自律機能の一つは宇宙空間に浮遊する物体の捕捉である。これは浮遊物体を認識し、その運動を把握した上で捕捉の動作を生成する一連のプロセスからなるが、以下では特に我々が検討している捕捉動作のためのセンサフィードバック制御と視覚を用いた浮遊物体の運動推定について説明する。

3. センサフィードバック制御

宇宙機自体が小型の衛星サービスロボットでは、マニピュレータの手先を制御するとき生

じる反力による宇宙機全体の姿勢変動を無視することができない。スラスタやリアクションホイールでその変動を抑えながらマニピュレータを動作させる方法も考えられるが、省エネルギーや動作の高速化、制御システムの簡単化のためには、マニピュレータのアクチュエータだけを駆動して手先を制御することが望まれる。また、手先や浮遊物体の位置や姿勢は、姿勢変動する宇宙機に搭載された視覚センサなどによって計測されることを考慮しなければならない。

そこで我々は、このような要求を満たす制御則として、宇宙機に搭載されたセンサの情報に基づいてマニピュレータの関節だけを駆動するフィードバック制御則を考案した。この制御則によれば、宇宙機自体の位置や姿勢の情報を使わずとも、宇宙機に搭載したセンサの情報のみで簡単に浮遊物体の捕捉動作が生成できる。しかも、捕捉動作遂行中の宇宙機全体のシステムは、複雑な非線形ダイナミクスに支配されているにもかかわらず、その安定性は常に保証される。図3のような2000kgの宇宙機に搭載された140kgの6自由度マニピュレータに対する動

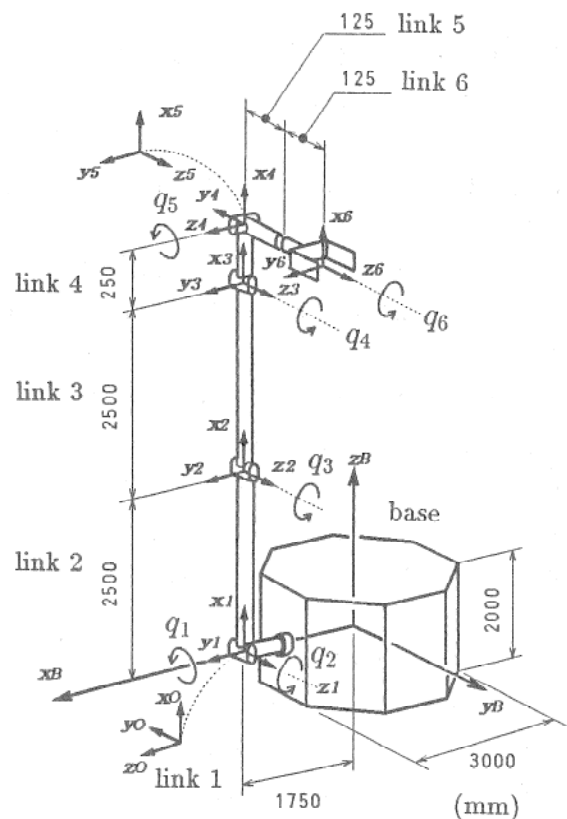


図3 衛星サービスロボットのシミュレーションモデル

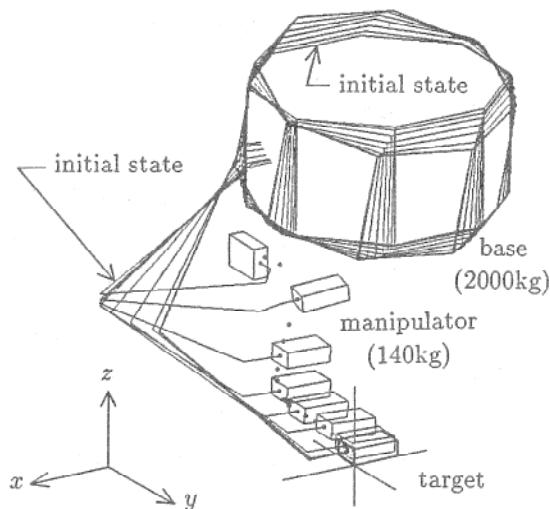


図4 浮遊物体捕捉のシミュレーション結果(3秒ごとに描画)

力学的なシミュレーションの結果の一例を図4に示す。この制御則を用いることによって、宇宙機が姿勢変動しても、手先の位置と姿勢を確実に目標の状態に到達させ得ることがわかる。

4. 浮遊物体の運動推定

種々の作業を衛星サービスロボットに自律的に行わせるとき鍵となるもう一つの技術は、作業の対象となる環境の認識である。地上ではほとんどの場合、作業対象は静止しているかあるいは拘束された運動しかしていないが、宇宙では何も拘束されずに自由運動する物体を扱わなければならない。したがって、衛星サービスロボットには、視覚センサなどの情報に基づいて物体の3次元運動を認識し予測する能力が要求される。

そのような目的で従来提案されているアイデアは、対象物体の主慣性モーメントの値や形状特徴などが既知であることを前提としている。したがって、未知物体や破損・変形などにより物理パラメータが変化してしまった物体を扱うことはできない。そこで我々は、対象物体が全く未知な場合でも画像情報のみからその運動を推定する方法を検討している。

運動している物体の画像情報が与えられても、その形状に関する知識がなければ、1つの画像中のある特徴点を特定の点であると認識することはできないし、連続する画像中の特徴点を継

続的に追跡することも難しい。しかし、短い間隔で撮影された2枚の画像から既存の方法で運動パラメータが近似的に求められることから、これらの時系列データに基づき以下のような考え方によって物体の力学的パラメータおよびその運動を推定することができる。

衛星軌道上を無重力とみなせば、剛体の回転運動はオイラー方程式

$$I_x \frac{d\omega_x}{dt} - (I_y - I_z) \omega_y \omega_z = 0$$

$$I_y \frac{d\omega_y}{dt} - (I_z - I_x) \omega_z \omega_x = 0$$

$$I_z \frac{d\omega_z}{dt} - (I_x - I_y) \omega_x \omega_y = 0$$

で表現される。ただし、 I_x, I_y, I_z は主慣性モーメント、 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ は角速度ベクトルのx,y,z成分である。対象物体が非対称の場合、オイラーの方程式の解は複雑な楕円関数で表わされるが、ポアンソンの楕円体として幾何学的に表現することもできる。この幾何学的表現を用いれば、画像情報だけで $I_x/(2E), I_y/(2E), I_z/(2E), L^2/(4E^2)$ の4つの値が求まる。ただし、 E, L はそれぞれ運動物体の運動エネルギー、角運動量ベクトルの大きさを表わしており、もちろん未知である。したがって、これらの値だけでは未知運動物体の慣性モーメントの絶対量を知ることはできないが、その運動予測は十分可能となる。

5. おわりに

外界の影響によって内部の構造と機能が変化していくことは、生物の進化のプロセスが教えるところである。宇宙という地上と大きく異なった環境で活動する宇宙ロボットも、やはり固有の構造と機能を持つことになるのであろう。我々も、宇宙環境をよく理解し、日常の固定観念にとらわれない柔軟な思考を心がけなければならないが、宇宙環境を実際に経験できない制約が常に存在する。その点からも1995年から予定されている国際宇宙ステーション「フリーダム」建設による成果が大いに期待される。

参考文献

- 1) 升谷, 宮崎. 宇宙用マニピュレータのセンサフィードバック制御. 日本ロボット学会誌, Vol.7, No. 6, pp.647-655, 1989.
- 2) Fumio Miyazaki, Kazuyuki Yamamoto, and Yasuhiro Masutani. Sensory feedback based on improved transpose Jacobian controller. In Proc. IEEE Int. Workshop on Intelligent Motion Control, Istanbul, Turkey, 1990.
- 3) Yasuhiro Masutani, Fumio Miyazaki, and Suguru Arimoto. Sensory feedback control for space manipulators. In Takeo Kanade and Yangsheng Xu, editors, Space Robotics: Dynamics and Control. Kluwer Academic Publishers, 1992.
- 4) Yasuhiro Masutani, Fumio Miyazaki, and S.Arimoto. Sensory feedback for space manipulators. In Proceedings of the 1989 IEEE Conference on Robotics and Automation, May 14-19, 1989, Scottsdale, Arizona, USA, pp.1346-1351, 1989.
- 5) Fumio Miyazaki and Yasuhiro Masutani. Robustness of sensory feedback control based on imperfect Jacobian. In H.Miura and Suguru Arimoto, editors, Robotics Research: The 5th Int. Symp., pp.201-208. MIT Press, 1989.
- 6) 升谷, 宮崎. EVA ロボットの遠隔操作シミュレーション第2報. 宇宙用人工知能/ロボット/オートメーションシンポジウム'89講演集, pp.252-255, 1989.
- 7) Yasuhiro Masutani and Fumio Miyazaki. Simulation system for teleoperability experiments of free-flying space robots. In Proc. Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, pp.263-266, Kobe, Japan, 1990.

