解 説

宇宙ステーション用トラス移動型フレキシブルロボット

Light-weight Mobile Robot for Space Station Trusswork

上 野 浩 史^{*1} 青 木滋^{*1} 吉 田 哲 二^{*1} 金 出 武 雄^{*2}^{*1}清水建設株式会社, ^{*2}カーネギーメロン大学Hiroshi Ueno^{*1}, Shigeru Aoki^{*1}, Tetsuji Yoshida^{*1}, Takeo Kanade^{*2} ^{*1}Shimizu Corporation ^{*2}Carnegie Mellon University

1. は じ め に

宇宙ステーションでの宇宙飛行士による船外活動(EVA)は、真空、高レベル放射線、激しい温度変化、微小重力等の苛酷な環境下で実施されるため、危険度が非常に高く、有人宇宙活動の費用を増大させる主な要因になっている。宇宙飛行士の現場での判断とスキルが要求される作業は宇宙飛行士が実施し、検査・点検等の繰り返し作業はロボットが実行することによって、安全性と経済性を同時に高めることが可能となる。

本稿では、米国カーネギーメロン大学と清水建設が共同で研究を進めている「宇宙ステーション用トラス移動型マニピュレータ(Self-Mobile Space Manipulator=SM²)」を紹介する。本研究は、多機能・多用途をねらったり、人間に代替できる能力を持つ高度な宇宙ロボットではなく、むしろ軽量でシンプルな機構を有し、限られた範囲の宇宙作業に適用するロボットシステムの実現を目指している。シンプルで軽量の宇宙ロボットは、打上費用の削減や運用電力の低下につながるので、宇宙ロボットに望まれる主要な事項である。SM²プロジェクトでは、まず宇宙トラス構造物上を自律的に歩行移動するシステムを開発した。次に、トラスの組立や必要な監視作業を遠隔操作により実施するEVAロボットシステムへの用途の拡大を図った。現在、SM²は宇宙ステーション「フリーダム」での利用を想定して、トラス構造の設計変更に対応しながら研究を続けている。

2. SM²の構想と研究経緯

SM²は、軽量かつシンプルな機構を有する宇宙トラス上移動型の作業ロボットである。ロボットの機構をシンプルにすれば、その制御系や構造系、熱制御系を簡素化でき

る。また、トラス構造物上を自ら歩行移動すれば、モバイルトランスポートのような補助移動機構を必要とせず、信頼性と経済性において大きな利点がある。さらに、トラス構造物への影響を少なくするためSM²は電源を搭載し、遠隔操作時には軌道上の操作者と無線によって信号伝達する構想であるので、宇宙ステーションに対して独立性の高いシステムになっている。また、SM²は一步(約2[m])あたり15秒程度の移動速度を実現しており、実際に役立つ高い機動力を備えている。

SM²の研究は1989年に移動機構の研究から開始された。当時、「フリーダム」のトラス構造は立方体トラスユニットを直列につないだ構造が考えられていた。ユニットは一辺が5[m]のパイプ状のストラットと、ストラットの結合点に設けたノードから構成されていた。ストラットは移動ロボットの足場として強度不足と考え、SM²はノードを足場としてつかみながら歩行移動することとした。このSM²をSM²-Iと呼ぶ。SM²-Iはコンパスのように2本の脚を持ち、トラス面を歩行するのに必要最低限の5自由度を持っている(図1)。SM²-Iの2本の脚は軽量化をねらって意図的に柔軟リンクにした。ノードにSM²-Iを固定するため、各脚の先端にはそれぞれノードグリッパを装備した。歩行動作は、両端のグリッパを隣接する2つのノードに固定した状態から始め、一端の脚をノードから開放し、他の脚を中心に開放側の脚を近隣のノードへ移して再固定することで完了する。この歩行動作を両脚で交互に繰り返す。

図1 SM²-Iの移動機構

原稿受付 1994年1月19日

キーワード: Space Robot, Mobile Robot Mechanism, Flexible Manipulator Control, Teleoperation, Gravity Compensation

^{*1} 〒105-07 東京都港区芝浦1-2-3^{*1} Minato-ku, Tokyo^{*2} 米国ペンシルバニア州ピッツバーグ^{*2} Pittsburgh, PA, 15213-3890, USA

すことにより、トラス面上を移動する。実験室で1/3縮小モデルを製作し、トラス面上の移動と面から面への移り変え移動実験により、移動機構の有効性を検証した[4][7]。

1991年からは移動機構にマニピュレーション機構を付加し、宇宙ステーションでの作業を想定した研究を行った。一方の脚に2自由度構成の関節と把持用ハンドを新たに加え(図2)、作業時には移動機構の5自由度と合わせ合計7自由度となるので、冗長自由度を利用したトラス内部機器へのアクセスと障害物回避が可能となった。把持用ハンドには対象物をつかむ把持爪と、軌道上交換ユニット(ORU)を結合するためのドライバ、対象物近傍の画像を得るカメラ、その方向を示すレーザポインタが搭載されている。また、他方の脚には作業全体の画像を得るため、パン・ティルト機構を有するカメラを設置した。SM²-Iの移動機構の上にこのようなマニピュレーション機構を付加した実験モデルを製作し、ORU交換やトラスストラットの搬送を遠隔操作で実施し、比較的短時間で作業ができることを確認した(図3)[10][11]。

図2 マニピュレータ付き SM²-I

図3 SM²-I による ORU 交換作業

3. SM²の機構設計

1991年の宇宙ステーション「フリーダム」の設計変更及び建設方法の変更に伴い、SM²-Iの機構と作業内容を見直す必要がでてきた。「フリーダム」の主構造体は一辺5[m]の立方体トラスから、断面が一辺約2[m]の六角形で長さが約13[m]のモジュール型トラスへ、構成部材もパイプからH形断面のビームに変更された。H形断面のビームはパイプに比べ十分な強度を持つと考えるので、新しいSM²-IIはビームを足場として歩行することとした。このビームを利用したSM²-IIは、ノードを利用したSM²-Iに比べ歩行経路の制約が少なくなる。

また「フリーダム」の建設方法は、軌道上でトラス構造物を組み立てる方式から、地上で組み立てられた六角柱トラスモジュールをスペースシャトルで運搬し、シャトルアームを用いてモジュール同士を結合する方式に変更された。この変更の主な目的は建設時のEVA作業時間の短縮にあるが、「フリーダム」に配置されるカメラの絶対数が少ないため、トラスモジュール結合時の目視確認や運用時の保守点検に新たなEVA作業が発生する可能性がでてきた。そこでSM²-IIをカメラロケータとして使用し、適時適切な位置からの視覚情報を操作者に提示するシステムとした。

SM²-IIが新しい「フリーダム」のビーム上を歩行する場合には多様な三次元の移動が含まれ、障害物を回避しながら歩行する時もあるため、SM²-Iの移動機構の両端にそれぞれ1自由度関節を追加し、合計7自由度の構成とした(図4)。この構成は中央の関節に対して対称であり、歩行支持脚切り替え時の歩行制御を容易にした。SM²-IIのリンク長は六角柱モジュールをまたいで越えられるように、また、両端のグリップはビームを把持できるように新規に設計した(図5)。実験モデルは、トラスモジュールの小型化に伴い、実物大スケールにて製作した。

柔軟ロボットを設計する取り組み方のひとつに、質量はできるだけ1点に集中させ、相対的に他の質量が無視できるように質量配分を行うことが考えられる。SM²-IIのリンク設計では、リンク質量が関節やグリップの質量と比較して無視できるようにリンクを軽量化して、SM²-IIの制御モデルをシンプルにした。この結果、計算機モデルは実験モデルとほぼ一致した(図6)[6]。

SM²-IIの関節は、DCモータとハーモニックドライブ減速機、関節角度センサを一体として組み込んだ小型モジュール化構造である(図7)[1]。宇宙での保守メンテ時の予備部品数の削減と修理の簡略化を考慮し、各関節は同一の部品から構成されている。

六角柱トラスモジュールのビームにSM²-IIを固定するビームグリップは、ビームと結合した後に次の歩行ステッ

図4 6角柱トラスモジュール上を歩行する SM²-II 図5 SM²-II とトラスモジュール

プのベースとして機能する必要があるため、結合時にガタを抑えてバックドライブを少なくするような逆転防止機構を有する。H形ビームの断面形状は、場所によって異なった幅、厚みになっている。ビームグリッパのスライド幅とフィンガー長さをこれらの断面に対応できるように決定した(図8)。グリッパ内には、グリッパを開閉するための駆動機構、グリッパとビームとの相対位置関係を検出するための近接センサ、接触センサを組み込んだ。静電容量を利用した近接センサを開発し、電気回路も含めて3.5[cm]×4.5[cm]の基板内に小型化して、グリッパから

図6 第1関節角度に対する中央部加速度のボード線図

図7 SM²の関節

図8 ビームグリッパ

トラスビーム面までの距離とアライメント計測のために、グリッパ上の3ヶ所に搭載した。

SM²-IIには中央部と両端グリッパの3ヶ所にカメラモジュールを装備した。カメラモジュールは、自動または手動のズーム、焦点、絞りの機能とライトを有する。中央部カメラは、それぞれのグリッパ周辺視界を映すため、ティ

ルト機構がある。グリッパカメラは、ビーム接近時にビーム相対位置を計測し、視覚検査の際には近傍視界を映す。

4. SM²の制御とセンサ

SM²の制御にあたっては、主に3つの制約がある。まず、歩幅約2[m]に対し、SM²がビームを把持するために必要な先端位置決め精度が1[cm]程度であり、リンク長に対する精度要求が高く、関節角度センサだけに頼ったロボット先端位置決めが困難である。第2は、SM²は軽量化によるリンクの柔軟性と駆動部の高減速化による関節剛性低下によって、動作中に振動を発生しやすい。さらに、姿勢変化や対象物移送の際には、固有振動数が変化する。最後は、SM²の内部応力や宇宙ステーションへの影響を少なくするため、最大関節トルクが小さくなり、相対的に関節クーロン摩擦力が大きい。なお、通常、宇宙ロボットで問題となる動作反力の影響は、SM²が常にトラスと接続されていてトラスに対して軽量であることから、十分少ないと考えた。

これらの制約を克服して高速な歩行と正確な位置決めを実現するため、歩行動作制御は粗動作、微動作に分割して実行する。粗動作は、ビームからグリッパを開放後に、グリッパを上方に引き上げ、次の目標ビームの把持位置上方までグリッパを動かす動作である。粗動作では振動を励起せずに高速に動かすことがその主目的である。一方、微動作は粗動作後にグリッパを目標ビームの把持位置まで正確に位置決めしながら動かした後、ビームにグリッパを固定する動作である。微動作ではグリッパを精密に位置決めすることが要求される。

微動作においてグリッパの精密な位置決めを実現するため、グリッパカメラ情報とグリッパ近接センサ情報による目標ビームの相対位置検出を行い、リンクのたわみ等による先端位置制御誤差を補正する。カメラの視覚情報処理には、把持対象となるビーム周辺の画像を入力として、グリッパに対するビームの方向と位置ずれをベクトル要素として出力する3相のニューラルネットワークを用いた。グリ

ッパ近接センサは、視覚センサでは検出しにくいグリッパとビームとの距離とアラインメントを計測する。これらの計測結果をロボット制御系へフィードバックすることにより、グリッパをビームに約0.5[cm]の精度で制御できることが可能となった[5]。

粗動作の制御系は逆動力学に基づくコントローラに、ゲイン調整機構、振動除去フィルタ、加速度フィードバック等を付加したものである(図9)。微動作では、この系の外側にさらに、ビームの相対距離検出をフィードバックして、先端位置決めを行うループがある[7]。

SM²の姿勢変化に伴う動特性の変化は、動特性推定機構においてSM²の関節角度から固有振動数として算出される。ゲイン調整機構は、算出された振動数からコントローラゲインと、振動除去フィルタの遮断周波数等を更新する。これらの機構によって、姿勢によらず安定した動作が実現できた[6][8]。

第1関節旋回動作は、固有振動数が最も低く、振動除去フィルタの遮断周波数も低い。グリッパ先端の加速度をフィードバックすることにより、振動除去フィルタの位相遅れを補償し、コントローラゲインを高く設定できる。これにより、制御のバンド幅の向上を実現できた[2]。なお、逆動力学は、現在のところ剛体モードのみを使用している。

柔軟リンクを有するSM²が未知の物理特性の対象物を安定して移送できるように、モデル規範適応制御に基づいた制御系を提案した。この適応制御系によりSM²はロボット先端質量の3倍程度の未知対象物を安定して移送できることを実証した[9]。さらに、動特性が未知の柔軟アームを有するロボットを制御するために、ニューラルネットワークを用いたリアルタイム学習制御を試みた[13]。

軽量化と無重力の影響により、SM²のクーロン摩擦は、操作トルクの30%にまで達する。摩擦は関節の角速度、角度、負荷等に関連し、モデル化は容易でないので、各関節に経験的に求めたメンバシップ関数とルールベースを用いたファジー制御を導入した。その結果、軌道誤差及び定

図9 制御ブロック図

常偏差を減少できることを確認した[17].

5. 遠隔操作制御

SM²の操作には、視覚情報提供作業や検査作業時の遠隔操作を主体とする操作と、歩行移動時の自律制御を主体とする操作とがある。遠隔操作の際には、遠隔操作装置から作業支援を受けながら操作し、自律制御の際には、不測の状況で操作者が介入できるようになっている。操作者は軌道上に配置されると仮定しているので、操作の際の通信時間遅れや通信容量の制約は特にはないと考えた。

SM²を遠隔操作する際には、操作者はSM²のカメラから得られる視覚情報を基に六軸コントローラ型の入力装置で操作する。“The Bird”と呼ばれるこの入力装置は、操作者周辺に構成した電磁場の中で、操作者が動かす鉛筆型操作部の位置と姿勢情報を検出する装置であり、この情報をSM²の先端位置姿勢にマッピングすることにより、SM²に入力を与える。この装置は鉛筆型の操作部が小型軽量であり、マスターアームのように一端を固定する必要がない。SM²の操作装置では、SM²への命令を音声化したり、力帰還情報を音響情報やディスプレイ画面に表示する方法で行う研究も進めている[18].

SM²の遠隔操作表示には、SM²に搭載されている先端と中央部にある2台のカメラモニタ出力とグラフィック表示とがある。歩行時には、固定足の切り替えによって、先端カメラの切り替えとティルト機構による中央部カメラの向きの変更とが自動的にできるようになっている。また、SM²と六角柱トラスモジュールとの位置関係をSM²の関節角度情報を基にオンラインでグラフィック表示し、SM²全体の姿勢が把握できるようになっている。

操作者の負担を軽減するため、大まかな指令を遠隔操作で行い、より細かい動作を計算機側が制御する協調制御を採用している。ニューラルネットワークを用いた視覚システムにより、トラスビームの損傷探査時に操作者の指示する速度に合わせて、ビームと一定の距離を保持しながらビーム上を動く動作を実現した[16].

歩行移動の操作は、SM²の最終位置を操作者が指示して、後は自律的に歩行計画及び歩行実施をすることを基本としている。軌道計画用シミュレーションを用いて、自動的に歩行計画を行い、生成したロボット軌道とトラス構造体との干渉チェックができる[18].

6. 重力補償装置

本研究において、SM²への重力の影響を少なくし、地上で実質的な実験を行うために、重力補償装置を開発した。重力補償装置は、カウンタウエイトによるSM²の自重を吊り下げバランスさせるシステムと、吊り下げ支持点の水平移動を追尾するサーボ制御システムとにより重力補償を

行う(図10)。重力方向のバランスシステムは、カウンタウエイトとワイヤー、プーリから構成される。カウンタウエイトはSM²とワイヤー、半径比が1/10のプーリを介してつなげられ、SM²の10倍の重量が取り付けられる。これは、カウンタウエイトのストロークをSM²の動作の1/10とし、SM²の重力方向の慣性増加を10%程度に抑えるようにしたものである。

水平方向のサーボ制御システムは、吊り下げ点を保持するキャリアとキャリアを水平面内で制御する2軸のサーボモータから構成される。キャリアには吊り下げ点のワイヤーの微小な角度変化を計測する光学式センサが搭載され、サーボモータは、SM²の水平方向の運動に合わせて、吊り下げワイヤーが常に垂直になるように追尾制御する。SM²が大きく運動するときでも安定して動作するように制御ゲインを選択し、SM²の速度が既定値以下になると、定常偏差を減少させるために自動的に制御ゲインを増加する制御方式を採用した。

重力補償装置は、SM²の動作状態で角度偏差0.025[rad]以下、静止状態で0.01[rad]以下に保つことができ、最大補償重量は14[Kg]である。ワイヤー摩擦の影響は吊り荷重の0.3%以下であり、限定された範囲ではあるが、3次元的な等速直線運動をほぼ再現できる。さらに、重力方向の性能を向上させるため、カウンタバランスをアクティブに駆動する研究も進めている[15].

7. おわりに

SM²は、軽量でシンプルな機構を有し、宇宙ステーション「フリーダム」の主構造体である六角柱形状のトラス構

図10 重力補償装置

造物上を自律的に歩行し、「フリーダム」の建設や保守に必要な簡易作業を軌道上からの遠隔操作により実施するEVAロボットシステムである。

「フリーダム」の設計変更に伴い、機構と作業内容を見直し、SM²の改良を実施した。SM²と、地上実験においてSM²の重量をキャンセルする重力補償装置、六角柱トラスモジュールを部分的に切り出したモックアップ等を用いて、トラス外面上であれば、どこへでも自律的に歩行できることを実験により確認した。また、遠隔操作システムによる、トラスモジュールのビームの損傷探査を遠隔操作にて実験し、検査作業がSM²を用いて実現できる可能性を示した。

参 考 文 献

- [1] B. Brown, M. Friedman and T. Kanade: "Development of a 5-DOF Walking Robot for Space Station," IEEE International Conference on Systems Engineering, August, 1990.
- [2] H. Ueno, Y. Xu, B. Brown, M. Ueno and T. Kanade: "On Control and Planning of a Space Station Robot Walker," IEEE International Conference on Systems Engineering, August, 1990.
- [3] T. Yoshida, H. Ueno: "Development of Self-Mobile Space Manipulator System," International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, November, 1990.
- [4] B. Brown, M. Friedman, T. Kanade, Y. Xu: "Self-Mobile Space Manipulator Project, Annual Research Review," The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1990.
- [5] D. A. Pomerleau: "Neural Network Based Vision for Precise Control of a Walking Robot," Machine Learning, Kluwer Academic Publishers,
- [6] H. Ueno, Y. Xu and T. Yoshida: "Modeling and Control Strategy of a 3-D Flexible Space Robot," IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems, November, 1991.
- [7] B. Brown, M. Friedman, T. Kanade, Y. Xu, 上野, 吉田: "宇宙移動マニピュレータロボットの開発," 第9回日本ロボット学会学術講演会, 1991年11月.
- [8] Y. Xu, B. Brown, M. Friedman and T. Kanade: "Control System of Self-Mobile Space Manipulator," IEEE International Conference on Robotics and Automation, May, 1992.
- [9] Y. Xu, H. Shum, J. Lee, T. Kanade: "Adaptive Control of Space Robot System with an Attitude Controlled Base," IEEE International Conference on Robotics and Automation, May, 1992.
- [10] Y. Xu, B. Brown, S. Aoki, T. Kanade: "Mobility and Manipulation of a Light-weight Space Robot," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, July, 1992.
- [11] B. Brown, M. Friedman, Y. Xu, T. Kanade, 青木, 上野, 吉田: "移動機構を有する宇宙作業用マニピュレータの開発," 機械学会 D&D Conference, 1992年7月.
- [12] J. Yang and Y. Xu: "Hidden Markov Model Approach to Skill Learning and Its Application in Telerobotics," IEEE International Conference on Robotics and Automation, May, 1993.
- [13] T. Newton and Y. Xu: "Real-time Implementation of Neural Network Learning Control of a Flexible Space Manipulator," IEEE International Conference on Robotics and Automation, May, 1993.
- [14] Y. Xu and M. Nechiba: "Fuzzy Inverse Kinematic Mapping: Rule Generation, Efficiency, and Implementation," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, July, 1993.
- [15] G. White and Y. Xu: "An Active Z Compensation System," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, July, 1993.
- [16] A. Douglas and Y. Xu: "Real-time Shared Control System for Space Telerobotics," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, July, 1993.
- [17] A. Schacherbauer and Y. Xu: "Fuzzy Inverse Kinematic Mapping for a Redundant Robot," JSME International Conference on Advanced Mechatronics, August, 1993.
- [18] Y. Xu, B. Brown, M. Friedman, T. Kanade, H. Ueno, S. Aoki and T. Yoshida: "Teleoperated Mobile Manipulator for Space Station," JSME International Conference on Advanced Mechatronics, August, 1993.
- [19] 吉田, 上野: "軌道上ロボットから月面ローバへ," 機械学会全国大会, 1993年10月.

上野浩史 (Hiroshi Ueno)

1963年12月3日生。1986年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。1988年同大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年清水建設株式会社入社。1989-91年カーネギーメロン大学客員研究員。宇宙ロボット、ロボット制御の研究開発に従事。1992年日本ロボット学会研究奨励賞受賞。日本機械学会、日本航空宇宙学会各会員。
(日本ロボット学会正会員)

吉田哲二 (Tetsuji Yoshida)

1949年4月17日生。1972年東京工業大学機械工学科卒業。同年清水建設株式会社入社。同社技術研究所ロボットグループ主任研究員、同社技術本部課長を経て宇宙開発室副部長。建設用ロボット、原子力用ロボット、宇宙ロボットの研究開発に従事。日本機械学会、日本航空宇宙学会、日本建築学会、SME各会員。
(日本ロボット学会正会員)

青木 滋 (Sigeru Aoki)

1965年10月25日生。1988年東京理科大学工学部機械工学科卒業。1990年名古屋大学大学院航空工学修士課程修了。同年清水建設株式会社入社。1991-94年カーネギーメロン大学ロボティクス研究所客員研究員。宇宙ロボットの研究開発、ロボットの機械設計に従事。日本機械学会、計測自動制御学会各会員。

金出武雄 (Takeo Kanade)

1945年10月24日生。1973年京都大学電子工学科博士課程修了。同年同情報工学科助手。1976年助教授。1980年CMUに移る。1985年同教授。1992年ロボティクス研究所所長。1994年U.A. and Helen Whitaker 教授。米国宇宙評議会航空宇宙エンジニアリング委員、NASA 先端技術諮問委員、カナダ先端研究所諮問委員。IEEE, AAAI の各 Fellow。
(日本ロボット学会正会員)