

3 自由度パラレル機構と宇宙用スマート効果器への応用

町田 和雄*¹ 戸田 義継*¹ 岩田 敏彰*¹
飯倉 省一*² 小松 督*²

New 3-DOF Parallel Mechanism and Application to Space-Born Smart End-Effector

Kazuo Machida*¹, Yoshitsugu Toda*¹, Toshiaki Iwata*¹,
Shoichi Iikura*² and Tadashi Komatsu*²

A new three-degree-of-freedom parallel mechanism called PMP (Parallel Moving Platform) is devised to develop a smart end effector which adds dexterous capability to a long space manipulator. The PMP consists of a platform connected to a fixed base by three linear actuators and three parallel constraint mechanisms, and it has the advantages of compactness, simple kinematic relation, and translational mobility in the direction of approach. The kinematics are expressed by simple algebraic formulations. This paper deals with the kinematics analysis of the PMP and its application to the smart end effector. The forward and inverse transformation, singular configuration, and work space analysis of the mechanism are described. Moreover, the development of the smart end effector using the combination of the PMP and a 3-axis gimbal, and experiment results are presented.

Key Words: Parallel Mechanism, Parallel Moving Platform, Kinematics of Parallel Manipulator, End Effector, Space Manipulator

1. はじめに

クレーンのように長いマニピュレータは宇宙の大形構造物の組立て、保守、運用に必須であるが、手先の位置決め精度や器用さが不足する。これを解決する方法として大形マニピュレータの先端に装着し、位置誤差や作用力を自動的・能動的に調整する、賢いエンドエフェクタ、“スマート効果器”の開発研究を行ってきた[1][2]。

このような効果器を実現するには、可動領域は小さくても良いが、コンパクトで負荷容量が大きく、制御の簡単なロボット機構が必要となる。一般に、コンパクトさと高剛性の特徴を有するものとしてパラレル機構が知られている[3][4]。しかし、スチュアートプラットフォームに代表される従来のパラレル機構[5][6][7]は運動学の計算が複雑になる場合が多く、高バンド幅の位置や力の制御を行うには不利である。特に宇宙では放射線のため搭載計算機の能力が制限され、複雑な計算を伴う機構の採用は困難となる。また、アクチュエータの実装やリンクの干渉を考えると、従来の機構では、手先として用いるにはコンパクトさがなお不十分である。そこで、運動学の単純

さとコンパクトさを特徴とする新しい3自由度パラレル機構を考案した。このパラレル機構は上記用途のみでなくロボット機構として広く応用可能と考えられる。本論文ではこのロボット機構の運動学と宇宙用スマート効果器への応用について述べる。始めに機構の仕組みを述べ、次に順運動学、逆運動学、特異点、ワークスペースの解析を述べる。さらに本機構の応用として、スマート効果器の試作結果と実験結果を述べる。

2. 3自由度パラレル機構

2.1 機構への要求

宇宙用の大形施設を作るには10[m]を越える長さのマニピュレータが必要とされるが、関節角の制御誤差やバックラッシュの累積、リンクの柔軟性などから先端の位置・姿勢の誤差が大きくなり、また、慣性質量が大きく力の動的な制御性能も劣化する。しかし大形マニピュレータには、光学系やアンテナ系などの組立て、保守作業や、浮遊体への追尾や低衝撃捕捉などの正確さや器用さが要求される作業も多い。ここではこれらに対応するため、大形マニピュレータの先端に極小化した6軸駆動機構を装着し、そこに配置したセンサに基づく制御により性能補償することを考える。この場合、親子式マニピュレータのように2本のマニピュレータを切り替えて用いるアプローチではなく、産業用ロボットのRCCを発展させたような、あたかも1本の器用な大形マニピュレータとして扱えるデバイスの開発を目標としている。

原稿受付 1993年1月18日

*¹電子技術総合研究所

*²株式会社東芝 研究開発センター

* Electrotechnical Laboratory

* Toshiba Corporation Research and Development Center

この6軸駆動機構への要求条件は、(1)コンパクトであること、(2)力制御がしやすいこと、(3)長手軸方向の並進性に優れていることである。3番目の要求は大形アームで位置決め後、長手軸方向にわずかに移動させ挿入、結合する作業が多いためである。これらを満たす機構として、並進と姿勢を分離し、並進3軸をパラレル・ムービング・プラットフォーム(以下PMP(Parallel Moving Platform)と呼ぶ)で、姿勢3軸をジンバルで構成する方式を考案した。3軸ジンバルに関してはよく知られているので、本論文ではPMPによる並進3軸機構を中心に議論する。

2.2 PMPの構成

Fig. 1にPMPのリンク構成を示す。下の台Aは大形マニピュレータの取り付け部とし、上の移動台Bは姿勢用3軸ジンバルとグリップの取り付け部とする。台AとBは、ユニバーサルジョイントにより接続された3本のリニアアクチュエータリンクで結合されている。このリンクの長さを制御すること

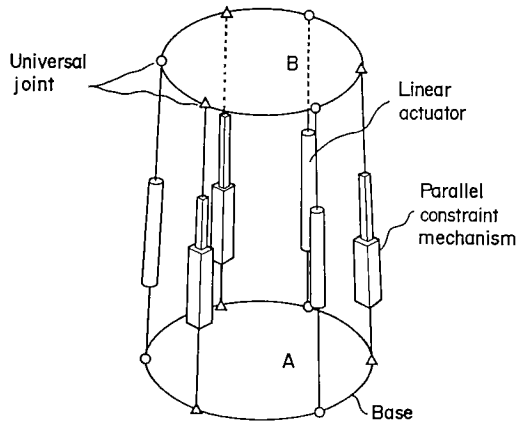


Fig. 1 Concept of parallel moving platform

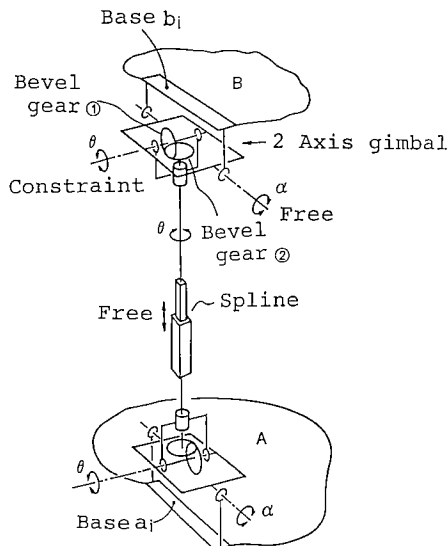


Fig. 2 Structure of parallel constraint mechanism

により、台Bを任意の位置に移動することができる。ただし、これだけでは台Bの回転3軸が全くフリーとなっているため、これに対する拘束が必要となる。そこで、平行維持機構(PCM (Parallel Constraint Mechanism) と呼ぶ)を各アクチュエータリンクの間に設ける。PCMはFig. 2のように構成する2軸ジンバルにより支持されたベース a_i 及び b_i が、それぞれ台AとBに固定されている。一方、これらの2軸ジンバルで支持した一对のマイタギア(歯数比1:1のかき歯車)がスプラインで結合されており、これを介してベース a_i と b_i が結びついている。いま、台Bの面内の回転が拘束されているとする。このとき、ベース b_i は α 軸回りには回転自在であるが θ 軸回りには拘束されており、常にベース a_i と平行になる。なぜなら、ベース b_i を θ 軸回りに回転すると、その回転がマイタギア①から②、更に下部のマイタギアに伝わり、ベース a_i をベース b_i と同方向に回転させるためである。したがって、PCMを2本用いることで、面外回転を拘束し、A、B面の平行を常に維持することができる。

さらに、PCMを3本使うと次の理由で面内回転も拘束できる。説明の簡単のためFig. 3(a)のようにPCMを3本等配した場合を考える。ベース a_i は台Aに固定されている。今、ベース $b_1 \sim b_3$ は O_B を中心にそれぞれ Γ だけ回転できたと仮定する。これはFig. 2においてベース a_i を固定してベース b_i を面内で Γ だけ回転させたことになるので、かき歯車①は②の上を Γ だけ転がり、 b_i は Γ だけ面外に傾くことになる。したがって、ベース $b_1 \sim b_3$ はFig. 3(b)に示したように円錐面を形成する。つまり、ベース b_i はこの円錐内に含まれなければならない。ここで、ベース b_i が2つの場合はこの2つを含む平面が存在するので台Bの回転が許される。しかし、3つの場合はこれを同時に含む平面は存在しない。つまり、Bが剛であれば最初の仮定は成立しない。以上より、PCMを3本用いることで回転3軸を拘束することができる。

したがって台Bは台Aに平行を保ったまま x, y, z の3方向に移動する機構となる。この機構は全パラレルとシリアルリンクの特徴を適度に兼ね備えている。マイタギアの構成によりスチュアート機構より剛性は低いコンパクト化が図れ、また、リンクの並列配置のためシリアルリンクより負荷能力の向上が期待される。

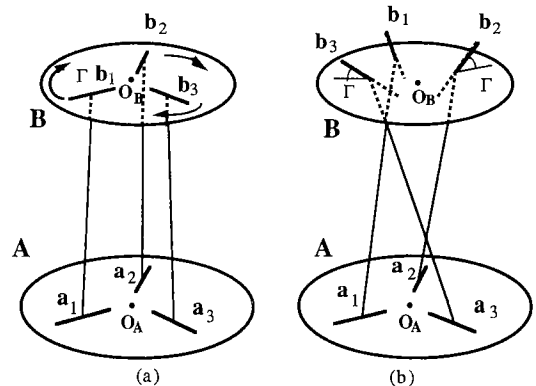


Fig. 3 Rotation constraint of PCM

3. 運動学の解析

3.1 順運動学と逆運動学

ここではPMPの運動学の解析を行う。Fig. 4に示すように、3本のアクチュエータを台Aでは半径Rの円周にA₁, A₂, A₃で、台Bでは半径rの円周にB₁, B₂, B₃で等配して結合した場合を考える。図において動作原点での形状は実線で、移動後は破線で示し、移動後の各対応点は'で示している。なお、PCMは運動学解析に不要なので省略してある。△A₁A₂A₃と△B₁B₂B₃は正三角形となっており、アクチュエータ動作原点での台Bの高さHとする座標系O_AX₀Y₀Z₀における各点の位置は次のようになる。

$$\begin{aligned} A_1 &: (R, 0, 0), & A_2 &: \left(-\frac{R}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}R, 0\right) \\ A_3 &: \left(-\frac{R}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}R, 0\right) \\ B_1 &: (r, 0, H), & B_2 &: \left(-\frac{r}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}r, H\right) \\ B_3 &: \left(-\frac{r}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}r, H\right) \\ B'_1 &: (x+r, y, z+H) \\ B'_2 &: \left(x-\frac{r}{2}, y-\frac{\sqrt{3}}{2}r, z+H\right) \\ B'_3 &: \left(x-\frac{r}{2}, y+\frac{\sqrt{3}}{2}r, z+H\right) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、(x, y, z)は台Bの中心点O_BからO_B'への変位を表す。したがって、各リニアアクチュエータの長さをh₁, h₂, h₃とすると幾何学的拘束条件から次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} h_1 &= \overline{A_1B'_1} = \{(x-2d)^2 + y^2 + (z+H)^2\}^{\frac{1}{2}} \\ h_2 &= \overline{A_2B'_2} = \{(x+d)^2 + (y+\sqrt{3}d)^2 + (z+H)^2\}^{\frac{1}{2}} \\ h_3 &= \overline{A_3B'_3} = \{(x+d)^2 + (y-\sqrt{3}d)^2 + (z+H)^2\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、2d=R-rとした。これは逆運動学の関係を表して

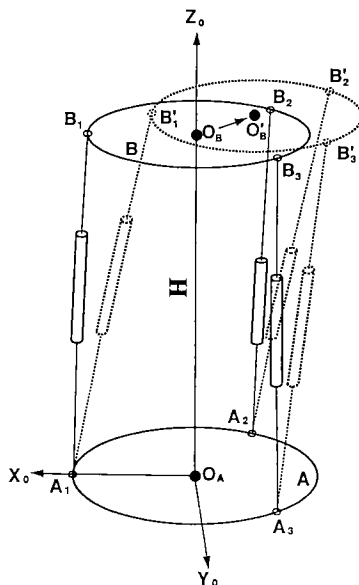


Fig. 4 Motion of Parallel moving platform

いる。

リニアアクチュエータの長さh₁, h₂, h₃から、移動台Bの中心点の位置(x, y, z)を求めるための順運動学表現は式(2)をx, y, zに関して解くことにより、

$$\begin{aligned} x &= (h_2^2 + h_3^2 - 2h_1^2) / 12d \\ y &= (h_2^2 - h_3^2) / 4\sqrt{3}d \\ z &= (h_1^2 - (2d-x)^2 - y^2)^{\frac{1}{2}} - H \end{aligned} \quad (3)$$

と得られる。

順、逆いずれの運動学も三角関数を含まず、通常の回転シリアルリンクやパラレルリンクに比べはるかに簡単な数式で表されることが分かる。このことは機構を制御する際にプロセッサの負担を著しく軽減する。

3.2 ワークスペース

この機構の可動範囲は式(2)を用いて調べることができる。d及びHは定数なので、この式はh₁, h₂, h₃を半径とする球の方程式となっている。この3つの球がリニアアクチュエータの長さが変わることによって動く範囲の共通部分が台Bの中心点の可動範囲となる。式(3)よりdはこの機構の可動範囲を決める重要なパラメータであることが分かる。dの絶対値は小さいほどx, yの可動範囲が大きくとれるが、d=0では不

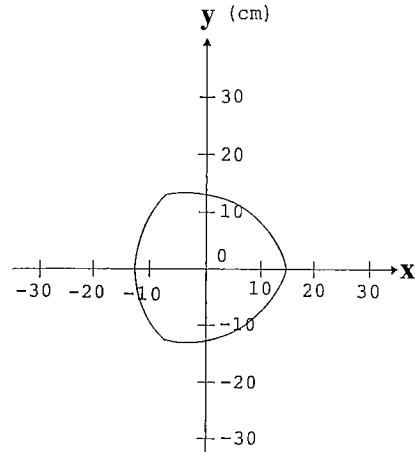


Fig. 5 (a) Work space of PMP (x-y plane)

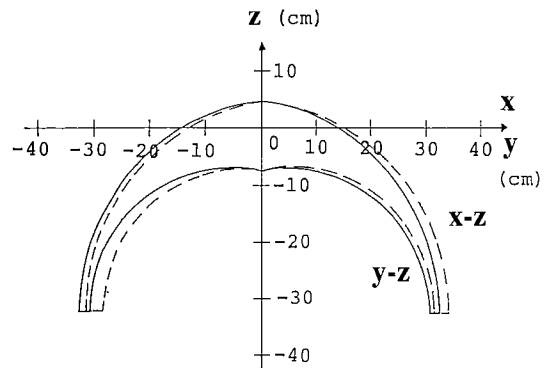


Fig. 5 (b) Work space of PMP (y-z plane (solid line), x-z plane (dashed line))

定となる。また、 d は負の値にすることもでき、式(3)からその xy 面での可動範囲は正の場合の回転対称となる。しかし、頭でっかちの安定性の悪い機構となるので、通常の用途では適当ではないであろう。

次に、具体的な可動範囲の例を求めてみる。いま、リニアアクチュエータの長さ h_1, h_2, h_3 の最大値を 375[mm]、最小値を 255[mm]、動作原点の高さ H を 325[mm] とする。これは、後述するスマート効果器の設計値に相当する。今、 $d=30$ [mm] として可動範囲を求めると Fig. 5 に示したものとなる。ここで、(a) は $z=0$ での xy 面における可動範囲を示す。また、Fig. 5(b) の実線は $x=0$ での yz 面における可動範囲を、破線は $y=0$ での xz 面における可動範囲を示す。可動範囲がこのように原点付近に限られるのは平行機構の特徴である。長さ 325[mm]、半径 $R=60+r$ [mm] でこの可動範囲が得られるので、コンパクトな平行機構であると言える。

3.3 ヤコビ行列と特異点

マニピュレータ先端の微小変位を与えるヤコビ行列 J は、

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial h_1} & \frac{\partial x}{\partial h_2} & \frac{\partial x}{\partial h_3} \\ \frac{\partial y}{\partial h_1} & \frac{\partial y}{\partial h_2} & \frac{\partial y}{\partial h_3} \\ \frac{\partial z}{\partial h_1} & \frac{\partial z}{\partial h_2} & \frac{\partial z}{\partial h_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(3)より各要素は次のように求まる。

$$\begin{aligned} J_{11} &= -h_1/3d, J_{12} = h_2/6d, J_{13} = h_3/6d \\ J_{21} &= 0, J_{22} = h_2/2\sqrt{3}d, J_{23} = -h_3/2\sqrt{3}d \\ J_{31} &= (h_1h_2^2 + h_1h_3^2 - 2h_1^3 + 12h_1d^2)/k \\ J_{32} &= (h_2h_1^2 + h_2h_3^2 - 2h_2^3 + 12h_2d^2)/k \\ J_{33} &= (h_3h_2^2 + h_3h_1^2 - 2h_3^3 + 12h_3d^2)/k \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、

$$k = 6d \{ (h_1^2h_2^2 + h_2^2h_3^2 + h_3^2h_1^2 - h_1^4 - h_2^4 - h_3^4) + 12d^2(h_1^2 + h_2^2 + h_3^2) - 144d^4 \}^{1/2} \quad (6)$$

このようにヤコビ行列も簡単な式で表され、力制御の計算が楽になる。

ヤコビ行列 J が求まったので、この平行機構の特異点を調べることができる。シリアルマニピュレータの場合はよく知られているように $\det J=0$ となる点が特異点であり、この点で先端の微小並進・回転の自由度が退化し、その方向の力制御ができなくなる[8]。これに対して、平行マニピュレータの場合はリンクがループを含んでいるため、 $(\det J)^{-1}=0$ となる点が存在し、ここもまた特異点とみなすことができる。ここでは各アクチュエータの微小変位についての自由度が退化する。式(4)、(5)より、

$$\det J = -2\sqrt{3}h_1h_2h_3/k \quad (7)$$

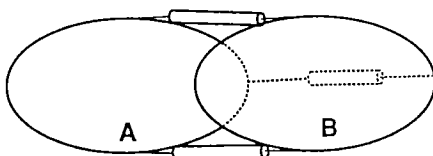


Fig. 6 Singular configuration of PMP

アクチュエータリンク長 $h_1, h_2, h_3 > 0$ なので $\det J=0$ となる点、すなわち先端運動についての自由度が退化するような点は存在しない。次に、 $(\det J)^{-1}=0$ となる点を求める。式(7)よりこの条件は $k=0$ となる。式(3)で z を書き下すと、

$$z = k/36d^2 - H \quad (8)$$

となるから、 $k=0$ のとき $z=-H$ となる。これは、Fig. 6 に示すようにアクチュエータリンクが倒れ移動台 B が台 A と同じ高さになった状態に相当する。これがこの機構の唯一の特異形態である。しかし各リンクの干渉やジョイント部の限界から、実際にはこの状態までには達しないのが普通である。

4. 宇宙用スマート効果器への応用

4.1 設計、試作

上で述べた PMP を用い、宇宙用の大形マニピュレータの先端に取り付け高技能化するスマート効果器を開発した。スマート効果器のシステム構成を Fig. 7 に示す。操作者が大形マニピュレータを対象物近傍に粗位置決めすれば、スマート効果器は近接位置・姿勢センサにより自動的に接近状態を判定し、精制御を行う。近接位置・姿勢センサはターゲットのマークを CCD テレビカメラで検出し、手先との相対位置・姿勢を実時間で計算する方法を用いている。スマート効果器はこの情報を用い、並進 3 軸 PMP と姿勢 3 軸ジンバル機構を制御してローカル座標で相対位置・姿勢誤差を補償するとともに、ターゲットへの接触後は力センサを用い、力、インピーダンスの制御を行

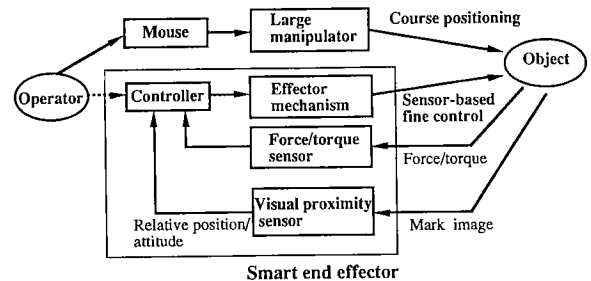


Fig. 7 System block diagram of smart end effector

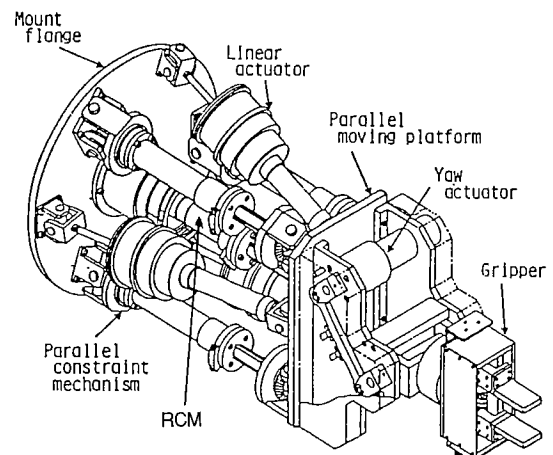


Fig. 8 Configuration of smart end effector

う。

Fig. 8 に試作した効果器の構造を示す. 今回の試作では PMP は 3 自由度とし, 姿勢用ジンバル機構は後述する 2 次元無重力試験のため, ヨー軸のみの 1 自由度とした. しかし, ほかの回転 2 自由度のアクチュエータを実装することを想定し設計してある. PMP は前に述べたように 3 本のリニアアクチュエータと PCM で構成できるがマイタギアによるバックラッシが存在する. より高精度の機構を得るにはこれを除去する必要がある. そのため面内回転拘束機構 (RCM (Rotation Constraint Mechanism)) を PMP の中心軸に設けた. RCM はスプラインの両端をユニバーサルジョイントで台 A, B に結合したもので, ロール方向の回転のみスプラインで拘束される. この RCM をどちらかに強制的に回し, あらかじめ戻りトルクを与えて結合しておけば, PCM のバックラッシを除去できる.

この機構を宇宙用のエンドエフェクタとして供するためには, 慣性質量を小さくし, 小形化を図る必要がある. リニアアクチュエータはそのキーとなる. そのため, ポール・スクリューと直流ブラシレスモータを一体化し, 小形・軽量化を図った

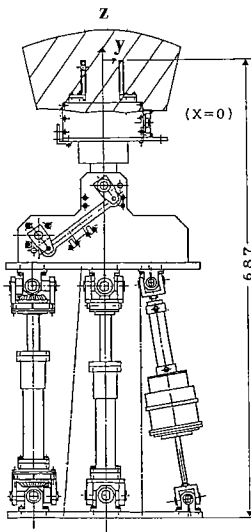


Fig. 9 Designed work space of smart end effector

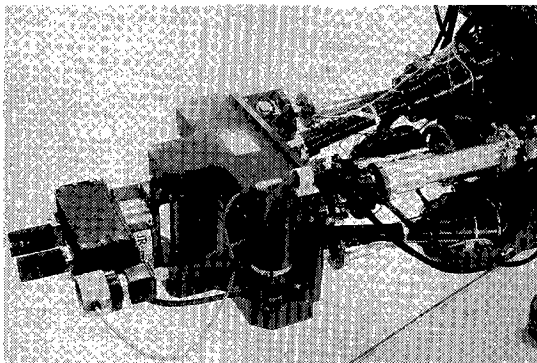


Fig. 10 Photo of developed smart end effector

ものを新たに開発した. このリニアアクチュエータは, 宇宙の真空での潤滑が問題となるため, 真空中での寿命試験を実施している [9].

PMP と姿勢ジンバルを含めた手先の運動学は, 3.1 節を基に付録に示したように得られる. 本効果器ではスペースシャトルのマニピュレータの絶対誤差 (± 50 [mm]) を補償することを想定し, ± 50 [mm] の立方体を手先の動作領域の仕様とした. アクチュエータの干渉を考慮し, $d=30$ [mm], $H=325$ [mm], 255 [mm] $\leq h_1, h_2, h_3 \leq 375$ [mm], RCM の転倒制限角度を ± 15 deg, ヨー軸の回転制限を ± 15 deg とすると, 付録から Fig. 9 の斜線部で示す可動範囲を得る.

Fig. 10 に試作したスマート効果器の写真を示す. 全体の重量は 22 [Kg] であり, このうち PMP は 16 [Kg] であった.

4.2 実験結果

スマート効果器単体の性能を調べるため, 揺動するターゲットの捕捉を想定し, XY ステージに搭載したターゲットを往復運動させ, 近接位置・姿勢センサによるフィードバックで追跡しながらターゲットを把持しに行く動作を行わせた. 実験結果を Fig. 11 に示す. 図の上 2 つはターゲット (破線) と効果器手先 (実線) の x, y 座標をプロットしており, 下の図は手先の z 座標をプロットしている. 効果器は約 6 秒後に「tracking」のコマンドを受け, ターゲットの面内追跡 (x, y) を開始し, その 10 秒後に揺動するターゲットに対し追跡しながらグリッパを近付ける動作が行われている. 制御にはラップトップ計算機 (i80386/387) を用い, 制御周期は近接センサの画像処理周期と合わせ 1/60 秒としている. x, y, z の各方向が干渉せず, 本機構が良好に働いていることがわかる. なお, 位置制御精度

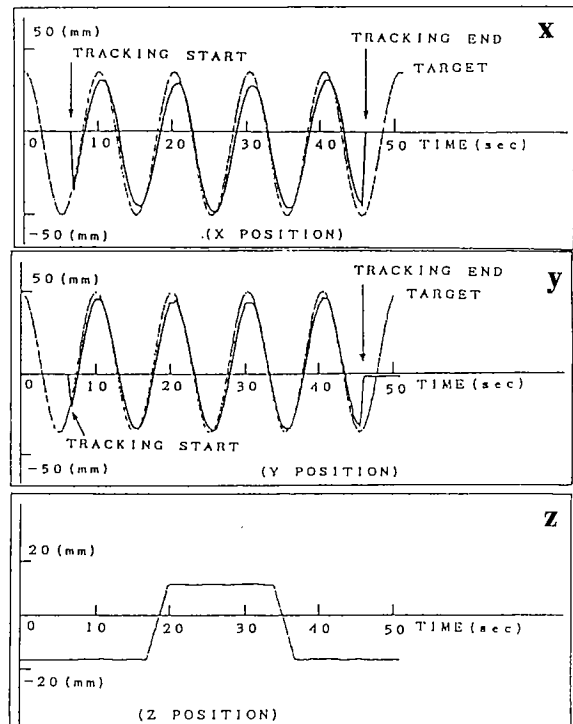


Fig. 11 Result of tracking experiment for moving target

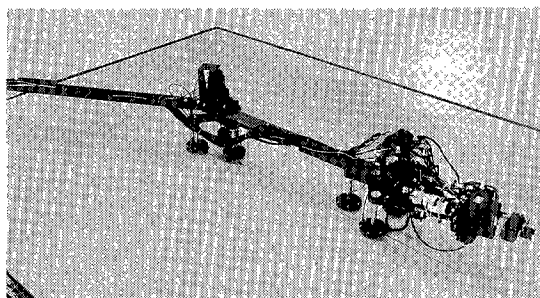


Fig. 12 Experiment scene of smart end effector attached to long manipulator

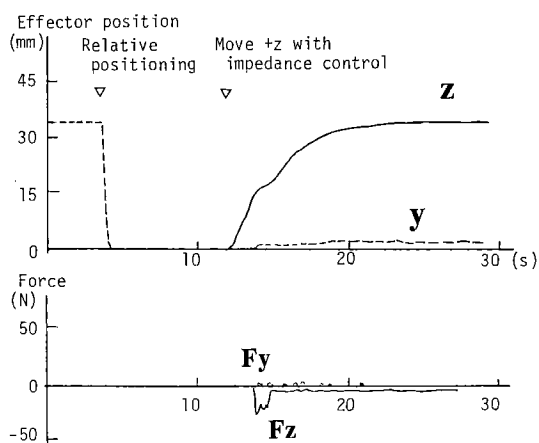


Fig. 13 Result of pin insertion experiment by long-manipulator/smart-end-effector

の実測値は ± 1.2 [mm], 姿勢制御精度は $\pm 1.5^\circ$ であった。この精度は主に近接センサの精度に依存しており、センサの精度を向上させることで、更に高精度化が期待できる。

次に、宇宙の無重力での作業を想定しスペースクレーンを模擬した 2 自由度大形マニピュレータの先端にスマート効果器を取り付け、全長 4 [m] のシステムとして、位置決め、動物体追跡、ピン挿入、ターゲット捕捉の実験を行った。Fig. 12 に実験の様子を示す。大形マニピュレータの肘と手首部に気体軸受キャスタを取り付け、2 次的に無重力運動を模擬している。

ピン挿入作業における位置、力の実験データの一例を Fig. 13 に示す。操作者は大形マニピュレータを挿入穴の近傍に近付ける。このとき先端と穴の間に y 方向で数十 [mm] の位置誤差が見られる。スマート効果器は近接センサによりマークを認識すると自動的に相対位置・姿勢の精制御を行い (Relative positioning), 誤差を ± 1 [mm] 程度に追い込む。挿入時 (Move +z) には効果器先端の力・トルクセンサによる機構のインピーダンス制御が行われ、この誤差が吸収され、スムーズな挿入作業が行われている。この場合のピンと穴のクリアランスは 0.5 [mm] である。このように先端にスマート効果器を取り付けると、かなり長いマニピュレータでも精密作業が可能となる。

これらの実験により確かめられた作業性能を、スマート効果

Table 1 Task execution performance with and without smart end effector

Task performance	Without smart end effector	With smart end effector
Positioning accuracy		
Position	± 50 [mm]	± 1.2 [mm]
Attitude	± 10 [deg]	± 1.5 [deg]
Tracking accuracy*		
Position	NA	± 3.3 [mm]
Attitude	NA	± 3.4 [deg]
Peg in hole		
Clearance	NA	< 0.5 [mm]
Typical force	NA	x,y; 3 N,z; 20 N
Target capture		
Backdrive force	NA (15~35 N)	< 3 N

*Target speed = 80 [mm/s]

器を用いない場合と比較して Table 1 にまとめた。大形マニピュレータのみでは不可能な高技能の作業が可能となっている。この方式はスマート効果器がセンサベース自律制御を行っているため、地上から宇宙の大形マニピュレータを遠隔操作する場合でも、通信遅延の影響を余り受けずデリケートな作業を可能とする。

5. 結 び

コンパクトさと運動学計算の容易さを特徴とする新しい 3 自由度パラレルリンク機構を考案し、その順・逆運動学及びワークスペース解析を行った。また、ヤコビ行列を求め、特異形態について論じた。平行維持機構 PCM の採用により、簡単な代数式でアクチュエータリンク長と並進 3 軸の運動学的関係が与えられ、かつ形状のコンパクト化が図れることを示した。また、この機構を用いて宇宙用スマート効果器を試作し、大形マニピュレータ先端に取り付け、宇宙でのデリケートな作業に有効であることを実験により示した。この機構はロボット・マニピュレータのほか、可動範囲は余り必要としないが、コンパクトさと負荷容量が要求される分野、例えば能動形ドッキング機構、マスターアーム、宇宙機シミュレータなどに応用できるものと考えられる。

参 考 文 献

- [1] 町田他: "宇宙マニピュレータ用スマート効果器の試作", 第 7 回日本ロボット学会講演会, 1989.
- [2] K. Machida et al.: "Smart end effector for dexterous manipulation in space," AIAA J. of Guidance, Control, and Dynamics, vol. 15, no. 1, pp. 10-16, 1992.
- [3] 日本ロボット学会誌 "パラレルメカニズム特集", vol. 10, no. 6, 1992.
- [4] 津坂他: "パラレルマニピュレータの設計と機構", 日本ロボット学会誌, vol. 5, no. 3, pp. 180-187, 1987.
- [5] D. Stewart: "A platform with six degrees of freedom," Proc. of the Institute of Mechanical Engineers, vol. 180, no. 1, pp. 371-386, 1965.
- [6] F. Behi: "Kinematic analysis for a six-degree of freedom 3-PRPS parallel mechanism," IEEE J. of Robotics and Automation, vol. 4, no. 5, pp. 561-565, 1988.
- [7] K. M. Lee and D. K. Shah: "Kinematic analysis of a three-degree

-of-freedom In-parallel actuated manipulator," IEEE J. of Robotics and Automation, vol. 4, no. 3, pp. 354-360, 1988.

- [8] 内山: "ロボットアームの機構解析と評価", コンピュータロール, コロナ社, 1985.
- [9] 岩田他: "宇宙用リニアアクチュエータの開発", 第32回宇宙科学技術連合講演会, pp. 742-743, 1988.

付 録

A. PMPと姿勢3軸ジンバルを結合した場合の運動学

本機構が並進3軸と姿勢3軸を分離していることから, 手先の絶対位置・姿勢を $(X, Y, Z, \theta, \phi, \psi)$, 各アクチュエータの変位を $(h_1, h_2, h_3, \alpha, \beta, \gamma)$ とすると順・逆変換は次のように得られる。ここで, θ, ϕ, ψ はオイラー角, α, β, γ はジンバルの x, y, z 軸回りの回転角とする。

A.1 順変換

アクチュエータの変位 $(h_1, h_2, h_3, \alpha, \beta, \gamma)$ から手先の絶対位置・姿勢 $(X, Y, Z, \theta, \phi, \psi)$ を求めるには,

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \mathbf{P} \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} \quad (\text{A } 1)$$

ただし, x, y, z は式(3)より得る。また, (L_x, L_y, L_z) は台 B から見た手先の原点位置とする。

$$\begin{aligned} \theta &= t^{-1}(-sa/t\beta) \\ \phi &= t^{-1}(-ta/s\theta) \\ \psi &= t^{-1}\{(sac\gamma + cas\beta s\gamma)/(cas\beta c\gamma - sas\gamma)\} \end{aligned} \quad (\text{A } 2)$$

ここで,

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -c\beta s\gamma & s\beta \\ cas\gamma + sas\beta c\gamma & cac\gamma - sas\beta s\gamma & -sac\beta \\ sas\gamma - cas\beta c\gamma & sac\gamma + cas\beta s\gamma & cac\beta \end{bmatrix}$$

ただし, s は \sin , c は \cos , t は \tan , t^{-1} は \tan^{-1} を表す。

A.2 逆変換

手先の絶対位置・姿勢 $(X, Y, Z, \theta, \phi, \psi)$ からアクチュエータの変位 $(h_1, h_2, h_3, \alpha, \beta, \gamma)$ を求めるには,

$$\begin{aligned} \alpha &= t^{-1}(-s\theta t\phi) \\ \beta &= t^{-1}(cac\theta t\phi) \\ \gamma &= t^{-1}\{(c\theta c\phi s\psi + s\theta c\psi)/(c\theta c\phi c\psi - s\theta s\psi)\} \end{aligned} \quad (\text{A } 3)$$

h_1, h_2, h_3 は式(A1)と式(2)より得る。



町田和雄 (Kazuo Machida)

1945年8月31日生。1970年北海道大学精密工学修士課程修了, 同年電子技術総合研究所入所, 極限技術部宇宙技術研究室主任研究官, イオンエンジン, 宇宙ロボットの研究に従事。工学博士。計測自動制御学会, 日本航空宇宙学会, AIAAなどの会員。(日本ロボット学会正会員)



戸田義継 (Yoshitsugu Toda)

1950年9月13日生。1975年名古屋大学航空工学修士課程修了, 同年電子技術総合研究所入所, 極限技術部宇宙技術研究室主任研究官, イオンエンジン, 宇宙ロボットの研究に従事。日本航空宇宙学会会員。



岩田敏彰 (Toshiaki Iwata)

1959年6月18日生。1984年大阪大学大学院基礎工学前期課程修了, 同年電子技術総合研究所入所, 極限技術部宇宙技術研究室主任研究官, 宇宙ロボットの研究に従事。日本航空宇宙学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)



飯倉省一 (Shoichi Ikura)

1948年8月16日生。1971年東京工業大学機械物理工学科卒業, 同年(株)東芝入社, 総合研究所(現研究開発センター)にて原子力機器の研究開発に従事。現在, 特殊ロボットの機構及びシステムの研究開発を担当。日本機械学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)



小松 督 (Tadashi Komatsu)

1958年1月26日生。1983年大阪大学大学院基礎工学前期課程修了, 同年(株)東芝入社, 現在, 宇宙設計部にて宇宙ロボットの制御の研究に従事。工学博士。日本機械学会, 計測自動制御学会の会員。(日本ロボット学会正会員)