

6.2 垂直直動型パラレルメカニズムの開発

Development of parallel mechanism by six vertical fixed linear actuators.

増田 峰知	藤原 基芳	村川 悟	田畑 康晴*
Takanori Masuda	Motoyoshi Fujiwara	Satoru Murakawa	Yasuharu Tabata
増井 孝実*	岡本 康男**	伊濱 啓一**	中村 達也***
Takami Masui	Yasuo Okamoto	Keiichi Ihama	Tatsuya Nakamura

* 三重県工業技術センター

** 三重県窯業試験場

*** 三重大学 (現 東京都立大)

Abstract

Readjusting characteristics of existed Parallel Mechanism, we have developed one whose six linear actuators are fixed vertical. A control calculation of this device is easily by arranged actuators vertical. This is composed of parts which is on the market, to make inexpensively. When we change design parameters characteristics (ex. working space, velocity, resolution) change. The principal design parameters are lengths of connection rods, radius of end effector, radius of imaginary base circle. In this report, it is showed application of material handling with six freedoms and a case to be cut by milling.

Keywords: parallel mechanism, vertical, invert kinematics, material handling, linear actuator

1. はじめに

近年、作業者の高齢化や雇用環境の変化などから、生産現場の自動化要求は高い。これは、作業効率だけでなく作業環境の向上からも要求される。一方、高付加価値なものづくりは、多品種少量生産が要求され、それは自動化への大きな障害となっている。これらに関して、あらゆる産業分野で共通する課題は、搬送作業の高効率化である。搬送作業には、熟練を要しない場合も多くあり、適切な補機類による省力化ができれば、未熟練者でも効率のよい作業が可能になると考えられる。

本開発では、搬送技術の中核であるハンドリング技術の高度化を目的とした。特にハンドリングツールとして、従来のロボットにはない特徴を持つパラレルメカニズムに注目し、その発展型の試作機を開発した。更に、試作機の逆運動学や動作特性を明らかにし、搬送や切削などの応用事例を検討した。

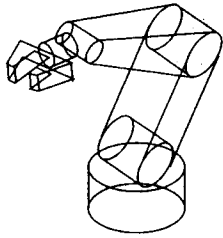
2. パラレルメカニズム

2.1 パラレルメカニズムとは

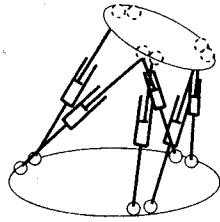
一般にパラレルメカニズムは、ベースとエンドエフェクタが並列的に配置された複数の対偶により連結した機構¹⁾である。最も代表的な機構として、古くからスチュワートプラットフォーム型²⁾が知られている。これは、3次元空間での位置と方向の6自由度が制御できるマニピュレータである。パラレルメカニズムは以下の特徴^{3) 4) 5)}を持っている。

- ①アクチュエータが並列的に配置されているため、手先での位置誤差が平均化され高精度
- ②アクチュエータの出力が並列的に作用するため、手先において高出力
- ③手先の位置と方向から、各アクチュエータの制御量を求める逆運動学が容易に求まる
- ④並列リンクのため、動作領域が狭い

6自由度を得るマニピュレータとしては、従来は多関節ロボット(パラレルメカニズムに対しシリアルメカニズムと称する)が一般的であった。シリアルメカニズムと比較した6自由度パラレルメカニズムの機構特徴を、Fig. 1に示す。



Serial Mechanism



parallel Mechanism

Merit

Wide moving area
Many back data
Direct Kinematics

Demerit

Low Power
Low accuracy

Merit

High power
High accuracy
Invert Kinematics

Demerit

Small moving area
Little back data

Fig.1 Compare characteristics of parallel mechanism and series one.

パラレルメカニズムが実用化された事例としては、以前は飛行シミュレータやアミューズメント機器などが主であった。最近、工作機械やロボットへの応用が発表され、製造現場への展開が進んでいる⁴⁾⁵⁾。将来的にはシリアルメカニズムが不得手であった分野への応用が考えられ、それぞれの特長を生かし補完し合う形でFAに展開されていくものと考えられる。

2.2 パラレルメカニズムの分類

現在までに提案されている実用的なパラレルメカニズムは、その駆動方式の違いから大きく3種類に区分⁴⁾⁵⁾されるようである。これらの区分の特徴を整理すると以下のとおりである。ただし分類名称は、学会等で規定されたものではなく、著者らが便宜上使用したものである。

①伸縮型パラレルメカニズム

2つの球対偶とその間に能動直動対偶を持つもの。Fig.2に示すような最も代表的なパラレルメカニズム機構である。一般にスチュワートプラットフォームと呼ばれている。この型は、1962年にGoughらによりタイヤテスト用装置²⁾として紹介され、Stewartにより多くの可能性²⁾が提案された。新井により運動学、力学特性⁶⁾が示されている。フライトシミュレータやアミューズ

メント分野などへの応用が広く知られている。機構がシンプルで逆運動学計算が簡単であるが、ハンドリング作業を考えた場合、アクチュエータ自体が動いたり、リンクそのものが大型化するため、動的な特性や、動作範囲は不利である。

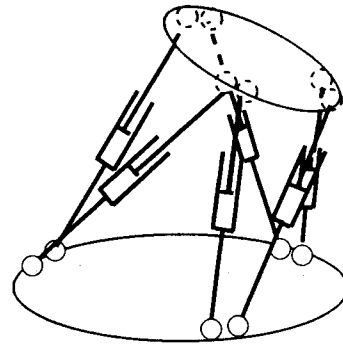


Fig. 2 Elastic parallel mechanism.

②回転型パラレルメカニズム

2つの球対偶とその外側に能動回転対偶を持つもの。Clavelにより3自由度のもの⁷⁾が、内山らにより6自由度のもの⁸⁾が示されている。回転対偶にアクチュエータを固定配置することで高速化と広い動作領域が得られる。3自由度型“DELTA⁷⁾”は、小型ワークの高速ハンドリング装置として実績がある。しかし、アクチュエータ側のリンクに曲げモーメントが発生するため手先での出力特性は小さく、重量物のハンドリングには不向きである。6自由度をもつ代表例をFig.3に示す。

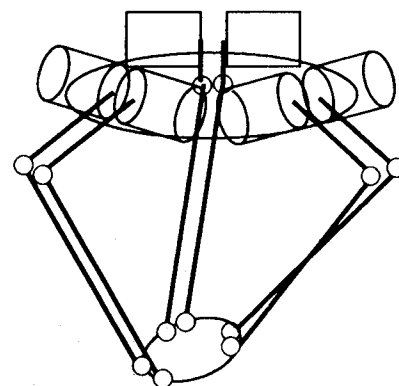


Fig. 3 Revolving parallel mechanism

①直動型パラレルメカニズム

2つの球対偶とその外側に能動直動対偶を持つもの。このタイプは、1つの球対偶と直動対偶を一体化しアクチュエータと共にベースへ固定す

ることで、可動部質量が小さくなり高速、高出力が期待できる。短所は、ベース部に大きなスペースが必要なことや逆運動学解析に2次式を解く必要があり計算量が多い。Merlet⁹⁾や新井¹⁰⁾らにより、運動学などが示されている。近年、数例の実用化が発表されており、佐藤により動揺装置¹¹⁾へ、遠山らにより工作機械¹²⁾への応用が示されている。アクチュエータは、一般にボールねじと直動ガイドからなる直動機構やリニアモータをアクチュエータに採用したものが考えられ、応用や製造を考えた場合、機構部分そのものは最も現実的である。代表例をFig.4に示す。

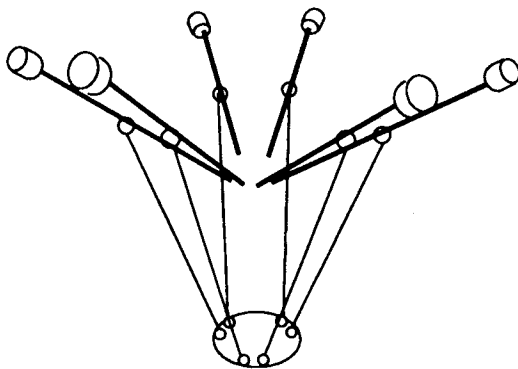


Fig.4 Linear fixed parallel mechanism

3. 逆運動学

3.1 パラレルメカニズムの逆運動学

手先の位置と方向から各軸の制御量を求める逆運動学計算が容易に解けるかどうかは、実用上重要な問題である。

一般に、6自由度パラレルメカニズムでは、エンドエフェクタにおいて位置と方向の6自由度(X, Y, Z, α , β , γ)を与えた時、可動プレートの6ジョイントのそれぞれ座標は、ベース座標原点からのベクトルで表される⁶⁾。これらのジョイントと対応する既知のベース側の6ジョイントとの間の距離を求めれば、これがそのまま制御量となる。

直動型パラレルメカニズムの逆運動学は、制御量の2次式で示されている¹⁰⁾。示されている式は、空間中の一点(可動プレート側の任意のジョイント)から、空間中の直線(直動機構側の対応するジョイントが動作する直線)までの距離が、ある

固有値(ジョイント間の距離=リンク長さ)になる場合の交点を求める式と等価である。

この機構の場合、2次式が示すように解が2つとも有効である場合が存在する。解の判別式や直動機構の有効範囲などで制限をしてもなお、解が2つになる場合は、どちらの解も成立するが、連続性や特異点通過の問題があるため、ハード的な制限により一方の解に限定する必要がある。

3.2 直動機構を傾斜配置させた場合の逆運動学

直動機構が放射状に傾斜配置されている直動型パラレルメカニズム場合、逆運動学は、幾何的に求められる。計算方法を以下及びFig.5に示す。

可動プレートの各ジョイント座標E_{ji}は、 $\overrightarrow{BoE_j} = \overrightarrow{BoE_{j0}} + \overrightarrow{E_{j0}E_{ji}}$ (iは以下i=0~5)で表される。また各直動機構の端点L_{ei}の座標は、既知の直動機構傾斜角 θ 、直動機構長さL_s、z軸方向単位ベクトル \mathbf{z} 及びベクトルBoB_iから次式で表せる。

$$\overrightarrow{BoL_{ei}} = \overrightarrow{BoB_i} + L_s \cdot \cos \theta \cdot (\overrightarrow{BoB_i} / |\overrightarrow{BoB_i}|) + L_s \cdot \sin \theta \cdot \mathbf{z} \quad (1)$$

また、制御量C_i、リンク長さL_c、L_{ei}におけるB_{ji}とE_{ji}の方向に挟まれた角 θ' 及び2つの三角形B_i-E_{ji}-L_{ei}とB_{ji}-E_{ji}-L_{ei}の関係から次の2式が成り立つ。

$$B_i E_{ji}^2 = E_{ji} L_{ei}^2 + L_s^2 - 2 \cdot E_{ji} L_{ei} \cdot L_s \cdot \cos \theta' \quad (2)$$

$$L_c^2 = E_{ji} L_{ei}^2 + (L_s - C_i)^2 - 2 \cdot E_{ji} L_{ei} \cdot (L_s - C_i) \cdot \cos \theta' \quad (3)$$

(2), (3)式を整理するとC_iに関して次式を得る。

$$C_i^2 + \{(E_{ji} L_{ei}^2 - B_i E_{ji}^2 - L_s^2) / L_s\} \cdot C_i + B_i E_{ji}^2 - L_c^2 = 0 \quad (4)$$

制御量C_iは、解の公式から次式となる。

$$C_i = 1/2 \cdot [(L_s^2 + B_i E_{ji}^2 - E_{ji} L_{ei}^2) / L_s \pm \{(E_{ji} L_{ei}^2 - B_i E_{ji}^2 - L_s^2) / L_s^2 - 4 \cdot (B_i E_{ji}^2 - L_c^2)\}^{1/2}] \quad (5)$$

得られたC_iの値は、 $0 \leq C_i \leq L_s$ を満たせば存在するが、得られた2値のどちらを選択するかは、解の連続性などを考慮する必要がある。

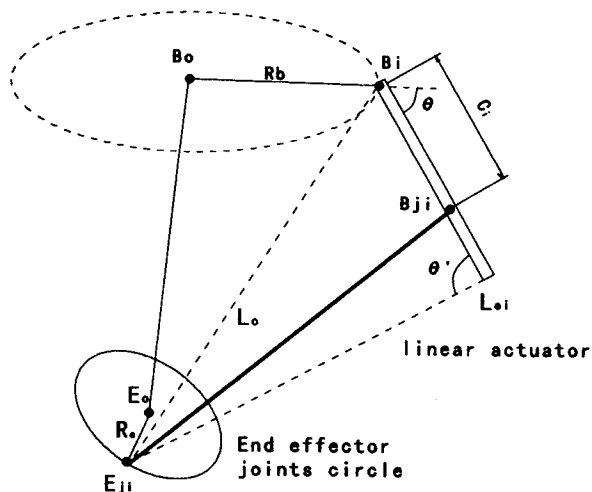


Fig. 5 Invert Kinematics by actuators tilt layout.

3.3 垂直直動型平行メカニズムの逆運動学

直動機構を垂直に配置した場合、より簡単な幾何によりその制御量を求めることができる。以下及び Fig. 6 において逆運動学解法を示す。Boをベース座標原点(0, 0, 0)とした時、可動プレートの各ジョイントEjiの座標(XEi, YEi, ZEi)は、 $\overrightarrow{BoEo} + \overrightarrow{EoEji}$ で表される。Ejiから仮想ベースプレート上に垂直におろした点Viの座標は(XEi, YEi, 0)であり、Biの座標及びリンク長さLcは既知であるから、台形Bi-Bji-Eji-Viの関係より、直動機構の制御量Ciは次式で求められる。

$$Ci = EjiVi - (Lc^2 - ViBi^2)^{1/2} \quad (i=0 \sim 5) \quad (6)$$

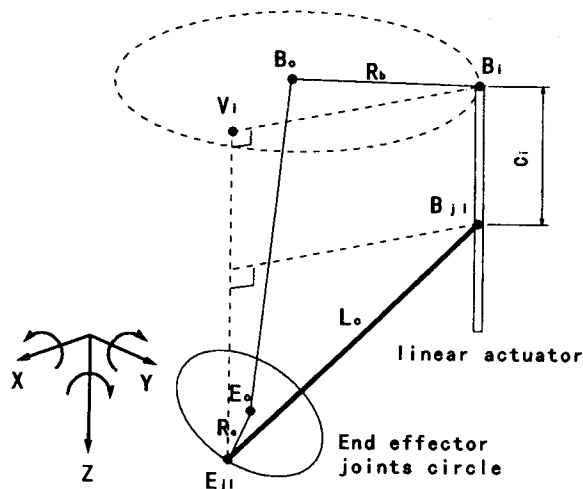


Fig. 6 Invert Kinematics by actuators vertical layout.

4. 試作した垂直直動型平行メカニズム

実用的なロボット機構を検討する場合、重力に対する仕事、即ち垂直方向の負荷能力と動作領域が重要な問題である。また、高出力、高速性、耐負荷能力も要求される。

これらのことや前述した逆運動学計算の容易さを考慮し、著者らはアクチュエータを2本1組120度対称に垂直配置した、垂直直動型平行メカニズムの開発を試みた。概要をFig. 7に、外観写真をFig. 8に示す。フレーム寸法は、幅1500mm奥行き1330mm、高さ900mmである。

垂直配置を採用した直動型平行メカニズムの特徴は、前述の高出力、高速性といった特徴だけでなく実用面での有利性も持っている。以下にその特徴を示す。

- ①市販の単軸直動機構が使用できるため構造がシンプルで、コスト、信頼性、保守性に優れている。
- ②垂直方向の実用動作領域が広い
- ③水平方向の設置スペースを最小限にできる
- ④可動範囲が架台内部に収まり、架台自体が安全柵の機能を持つ
- ⑤逆運動計算が簡単な幾何問題で解ける。これは、パーソナルコンピュータを利用したコンパクトな制御系の構築に有効である。

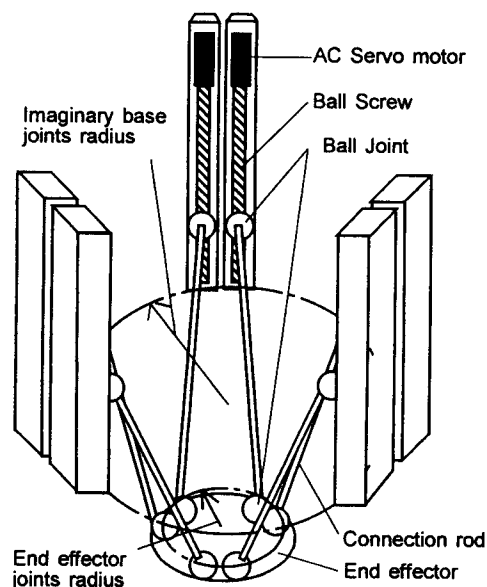


Fig. 7 Prototype of parallel mechanism by six vertical fixed linear actuators.

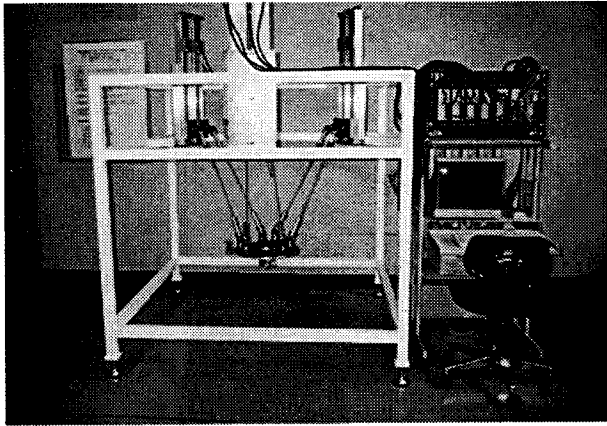


Fig. 8 Appearance of prototype

5. 試作機器構成

5.1 直動機構

単軸直動機構は、基本的なメカトロニクス要素の一つで、多くの種類が市販されている。採用した直動機構の仕様をTable 1 に示す。

Table 1 Specifications of using linear actuator

stroke	400mm
motor	AC servomotor 100 W
rev. limit	3000 rpm
screw lead	20mm
load limit	29.4 N (for vertical)
resolution	0.05mm
input	pulse
power	AC 100 V

5.2 球対偶軸受 (ボールジョイント)

パラレルメカニズムは、その構造から受動対偶、特に球対偶軸受を多く使用するが、軸方向のトルク伝達が考慮された一般的な球対偶軸受けは、揺動角が小さく、使用できない。本機は、Fig. 9 に示すニードルベアリングが組み込まれたカルダン型ユニバーサルジョイント (外径 42mm) と複列アンギュラ型ボールベアリング (内径 17mm, 外径 40mm) を組み合わせ球対偶軸受けを採用した。

ユニバーサルジョイントのクロス部の静的弾性限界は、実測で 32 kNであり、複列アンギュラ

型ボールベアリングの静的耐モーメント性能は、94.1 N-mであった。ワーク重量が数十kgを想定すると、これらは、いずれも十分な剛性を持ったものと考えられる。

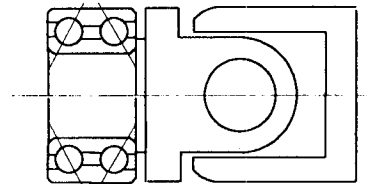


Fig. 9 3DOF joint

5.3 制御系及びインターフェース

制御装置は、パーソナルコンピュータ及びパルスモータコントロールボード (最高周波数 4 Mpps) を用い、パルス出力で直接モータドライバを制御している。

制御方法は、パーソナルコンピュータから変位量を与える位置制御で、モータ及びドライバ間のみフィードバックを行うセミクローズドループである。手先の位置と方向の 6 自由度情報を入力し、逆運動学計算により各軸の移動量と移動速度を求め、それに応じたパルス量と周波数をサーボモータドライバに入力し駆動している。位置のみを指令するピックアンドプレース作業は、PTP 制御で、空間中での擬似的な直線補間、円弧補間は、CP 制御で実現している。

6. 動作特性

6.1 設計パラメータ

垂直直動型パラレルメカニズムは、仮想ベース半径 (R_b)、可動プレート半径 (R_e)、連結ロッド長さ (L_c)、直動機構ストローク長さ (L_s) の 4 つの設計パラメータで、動作特性がほぼ決定され、これらを変更するとその動作特性を任意に変更することができる。これは、対象ワークがいろいろ変化するハンドリング作業においては、実用的に重要と考えられる。試作機に用いた設計パラメータは、Table 2 とした。

Table 2 Design parameters

imaginary base plate radius (Rb)	450mm
moving plate radius (Re)	150mm
connection rod (Lc)	720mm
linear actuator stroke (Ls)	400mm
joints position	symmetry by 120°
degrees of joint offset	base side ± 5.8° end side ± 15.0°

6.2 手先が回転をしない場合の動作領域

得られた動作領域は、円柱状で頂点付近が円錐に近い六角錐となった。一例として、Table 2の条件で(6)式をシミュレーションした結果から、Lcを600から1000mmまで200mmごとに変更した場合のそれぞれの動作領域をFig. 10に示す。実際は頂点を下向きにした形状である。動作領域は、Lcに比例し増えることが分かる。この場合、手先における水平方向の速度も大きくとれるが、この原理と同様に出力、分解能は劣化することが予想される。しかしながら、垂直方向のそれらは、直動機構の性能に依存することが自明である。

6.3 手先の方向性を考慮した動作領域

手先に回転などの傾きを加えた場合、動作領域は角度に応じて減少する。Fig. 11に、各軸回りにそれぞれ独立に回転させた時の、動作領域の体積変化をシミュレーションして得た結果を示す。

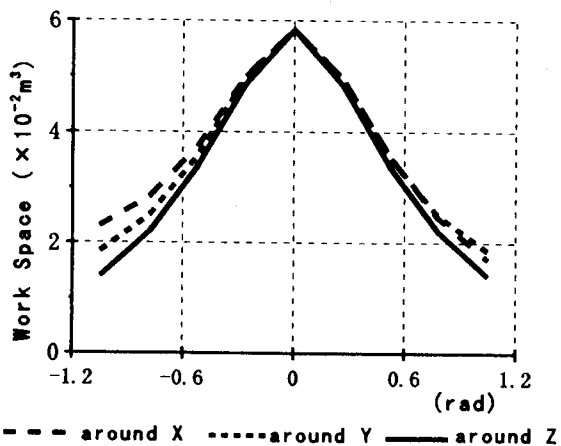


Fig. 11 Changes working space by turning end effector.

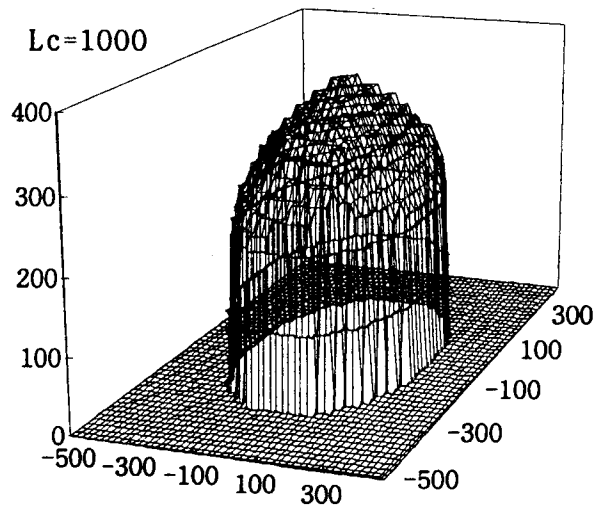
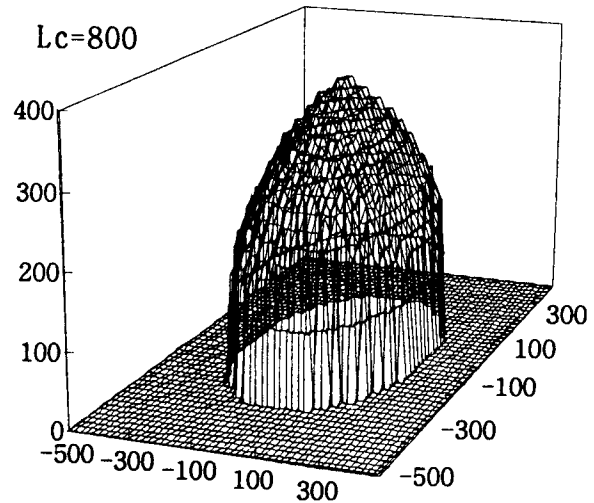
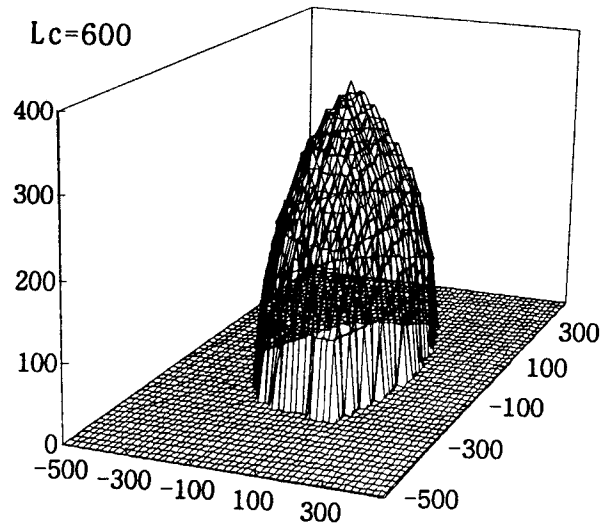


Fig. 10 Working space when converting link length.

7. ハンドリング作業実験

エンドエフェクタにエア式三爪チャックを用い、ハンドリング実験を試みた。3.6 kg のワークをクランプして、動作領域内でハンドリング作業ができることを確認した。Fig. 12, Fig. 13 にハンドリング作業の様子を示す。可搬ワーク重量、搬送速度、搬送位置分解能などの諸特性は、前述の動作特性で示したとおり、設計パラメータを変更することで調整ができる。パラメータを変更したときの繰り返し精度と出力を求めたり、必要性からパラメータの最適値を求めたりする設計支援計算方法の確立が今後の課題である。

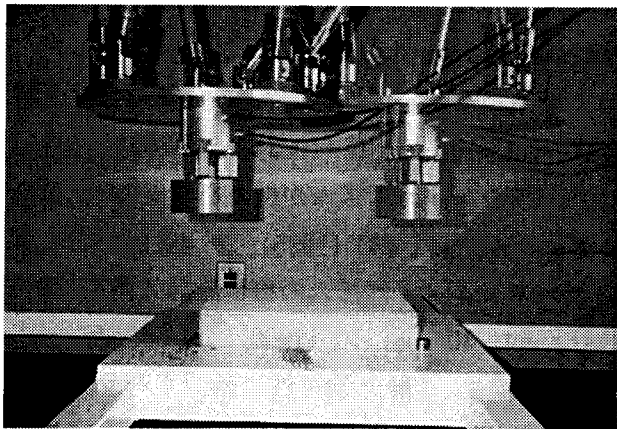


Fig. 12 Handling experiment, horizontal moving. (twice exposure)

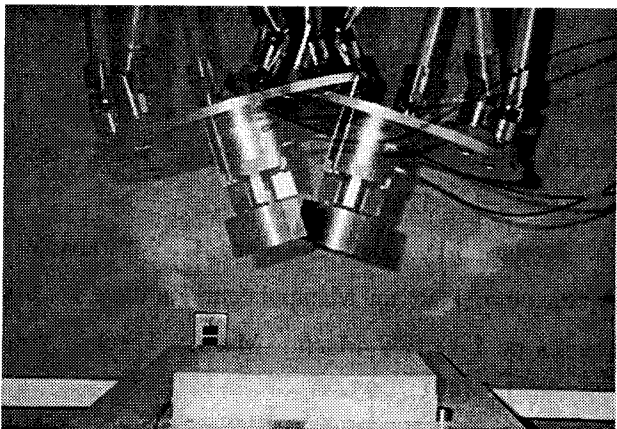


Fig. 13 Handling experiment, direction control.

8. 切削加工への応用

8.1 工作機械への適用

本機構は、ハンドリング装置を目的に試作され

たものであるが、その特徴から十分に多軸の工作機械への応用が考えられる。期待できる加工方法として、通常のフライス加工を始め、主軸を傾動させながらの曲面へのミーリング作業、すみ肉仕上げ、アンダーカット加工などが考えられる。これらの加工は、従来非常に高価な多軸加工装置により実現されていたが、本機構を応用することで安価な工作機械が提供できるものと考えられる。

8.2 切削加工実験

前記の加工を実現するために、Table 3 の仕様で加工実験を行った。

Table 3 Specifications of machining experiments

spindle	2400 rpm
tool	
for surface milling	ϕ 8 end mill
for character line machining	ϕ 13 ball mill
for under-cut milling	ϕ 6 ball mill
work	mixing paraffine wax

Fig. 14 に文字を削った加工事例を示す。被削マークは、三重県県章である。角エンドミルにより平面を出し、ボールエンドミルでマークを切削した事例である。平面研削、直線補間、円弧補間がなされていることがわかる。平面研削時の切り込み量と送りは、1mm と約 20mm/secであった。

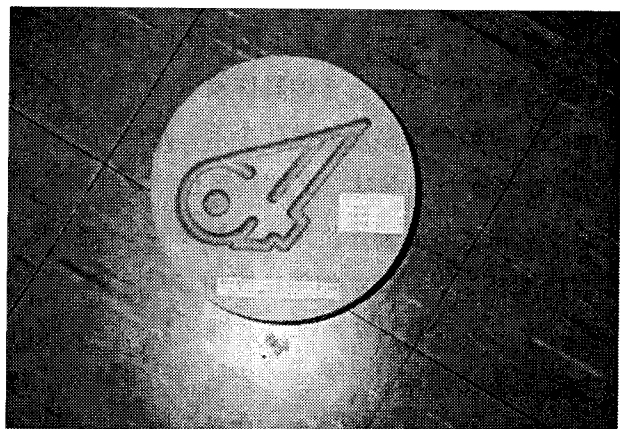


Fig. 14 Machining character line.

Fig. 15 に主軸を傾斜させながら加工した事例を示す。深い溝のすみ肉加工やアンダーカット加工の事例である。ミーリング、フライス加工を行い、多軸加工機の基本機能を持つことが確認できた。

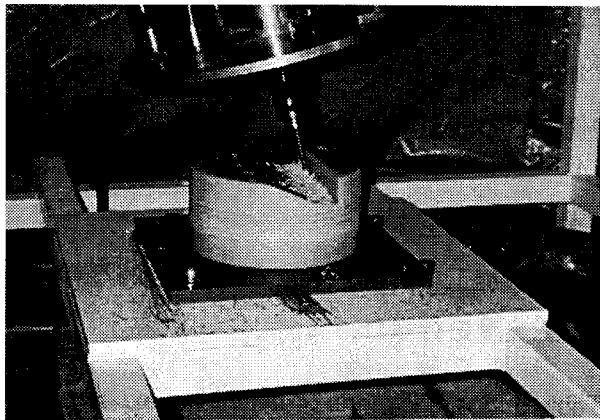


Fig. 15 Experiment by tilt milling

9. 結 言

本開発を通して、以下の知見を得た。

(1) 既存の平行メカニズムの特徴を検討し、重量物ハンドリングなどを想定した、垂直直動型平行メカニズムを開発した。

(2) 同装置は、既存の平行メカニズムに比べ、水平方向の設置面積が小さい、フレームがそのまま安全柵になる、主要構成部品を市販部品で実現するなど、実用的で低コストである。

(3) 同装置の逆運動学は、簡単な幾何で表せ、コンパクトな制御系の構築を可能にした。その結果、PTP 制御だけでなく、CP制御による6自由度の擬似的な直線補間と円弧補間が可能である。

(4) 設計パラメータを変化に注目し、連結ロッド長さを変化させたときの動作領域、手先を回転させたときの動作領域の変化を示した。

(5) ワークハンドリング作業例として、エア式チャックによる6自由度搬送実験を行った結果、多自由度ハンドリング作業に成功した。

(6) ツールハンドリング作業例として、多自由度加工装置に応用した事例を示した。主軸を傾動させたミーリング作業などに成功した。

謝辞

本開発の実施にあたり、ご指導を頂いた機械技術研究所ロボット工学部自律制御研究室新井健生室長（現大阪大学）、ハード部品製作や切削加工において協力を頂いた三重テクノフォーラムメカトロニクス研究会のメンバー一同に、謝意を表します。

参考文献

- 1) 舟橋宏明：“ロボット機構としての平行メカニズム”，日本ロボット学会誌，vol. 10，no. 6（1992），699-704.
- 2) Stewart, D.：“A Platform with six Degrees of freedom”，Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part1, vol. 180, no. 15（1965），pp371-386.
- 3) “特集平行メカニズム”，日本ロボット学会誌，vol. 10，no. 6（1992），695-769.
- 4) “平行メカニズムが機械を変える”，日経メカニカル，no. 450（1995），26-49.
- 5) “平行メカニズムの機構設計入門”，機械設計，vol. 40，no. 10（1996），17-65.
- 6) 新井健生：“静力学特性に基づく平行リンクマニピュレータの解析と統合”，日本ロボット学会誌，vol. 10，no. 4（1992），526-533.
- 7) Clavel, R：“DELTA, a fast robot with parallel geometry”，Proc. Int. Symposium on Industrial Robots（1988），91-100.
- 8) 内山勝他：“6自由度高速平行ロボットHEXAの開発”，日本ロボット学会誌，vol. 12，no. 3（1994），117-124.
- 9) Merlet, J-P. and Gosselin, C.：“Nouvelle Architecture Pour un Manipulateur Parallele a Six Degres de Liberte”，Mech. Mach. Theory, vol. 26, no.1（1991），77-90.
- 10) 新井健生：“直動固定型平行メカニズムの開発”，第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集，vol. 1（1995），55-56.
- 11) 佐藤衛：特公平7-54418「動揺装置」，特許公報（1995）.
- 12) 遠山退三他：特開平8-150526「工作機械」，公開特許公報（1997）.