

# パラレルリンクロボットによる生産革新

Production Innovation by Parallel Link Robot

藤原 茂喜  
Shigeki Fujiwara

高野 健  
Ken Takano

末藤 伸幸  
Nobuyuki Suefuji

## 要 旨

簡単な手づたえ教示機能を付加することで、変種変量生産における垂直立ち上げや熟練作業の再現に効果のある組立系のロボットを開発している。それは吊（つ）り下げ構造の6自由度制御可能なHexa型パラレルリンク機構を有し、駆動源であるダイレクトドライブモータの電源を切った状態で、エンドエフェクタを直接手で持って、安全で容易に作業の教示ができる特徴がある。また、教示データの編集機能も開発し、軌跡データを直感的で容易に修正や調整ができる。本ロボットを活用したシート貼り付け工程とカメラモジュール組立工程の自動化実現例を示す。

## Abstract

We developed a Parallel Link robot that can be taught operations easily by direct teaching. Our robot can realize a vertical startup of low-volume, high-variety production, and can replay skillful tasks which contain implicit knowledge. The robot has a Hexa-type parallel link structure and can move in Six-Degrees of Freedom (6-DOF) flexible posture. Easy and safe teaching is the feature of the robot: The end-effector can be grabbed directly by hand and taught the required motions safely after the motor power has been switched off. We also developed a teaching data editing function that can be used to modify and adjust taught track data intuitively and easily. We present the installation cases of camera module assembly automation and sheet pasting process automation.

## 1. はじめに

国内では円高や少子高齢化によって生産年齢人口が減少し、中国などの新興国では人件費高騰と労働者の確保が困難になっている。新たに新規の作業者を雇ったとしても、習熟するまでの時間を要し、そのための品質維持も課題となっている。そのような切迫した状況にあることから、今後、人に依存した生産体制から脱却し、設備を用いた機敏なモノづくり対応力が必要となると考えられる。よって、さらなる自動化を進めるべきであるが、下記課題があった。

- (1) 汎用的なロボットでは教育訓練を受けた専門的な知識が必要
- (2) 変種変量生産においてティーチングペンダントを用いた教示では時間がかかり機種への切り替えが困難
- (3) 高価

そこで、筆者らはこれらを解決する方法として、教示方法に注目した。ロボットのエンドエフェクタを手を持って教示できる簡単な手づたえ教示を実現している。

これにより、ロボットの専門的な知識がなくても、教示が可能となる。また、作業者が簡単に教示できるため、生産対象製品の切り替え時間の短縮が実現し、垂直立ち上げが可能となる。今回、利用するロボットとしては、パラレルリンクロボット [1], [2] である。このロボットは構造が簡単であり、共通部品が多いため低価格化しやすい。また、教示が簡単なので汎用性が高くなり、長期にわたって使用できるため、投資回収時間を長くでき

る。結果的に低コスト化できる。

さて、手づたえによる教示は、従来国内外で研究されてきた。しかし、複雑な熟練作業を実現できる6自由度制御型の垂直多関節ロボットでは、姿勢を維持するためにモータの電源を入れたままでなければならない。電源を入れない方法では、マニピュレータ部が重い繊細な作業の転写が困難である。よって、暴走などに対する安全性の問題を解決できず、各社実用化できていない。

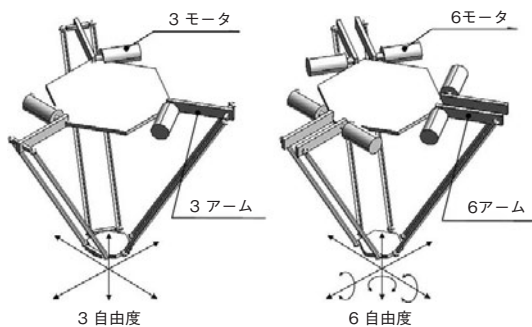
ところが、パラレルリンクロボットは、重量物のモータが固定部に装着されているため、マニピュレータ部は軽く手で簡単に動かすことができる。すなわち、モータ電源を切った状態で、エンドエフェクタだけを手で直接操作して動かしたい動作をさせる。そのときのエンコーダ情報を記憶する。これで、安全な手づたえ教示が実現できる。このようにモータの電源を切った状態で、安全に手づたえ教示できる方法は従来にはなく、ロボット教示作業を革新できる技術である。

ただし、パラレルリンクロボットは垂直多関節ロボットより容易に手づたえ教示が可能であるが、最大1.5 kg程度とはいえそのエンドエフェクタを手で動かそうとすると、熟練が必要で繊細な作業や非力な女性が手づたえ教示を行うことは難しいことがわかった。こうした課題を解決し、実用化するまでの内容について示す。まず、第2章でダイレクトドライブ機構と定荷重バネにより教示を容易にする新規なパラレルリンク機構について述べる。第3章では、直感的に容易に教示できる手づたえ教示、および容易に教示データを修正でき、教示作業の効率化

を実現する編集機能について述べる。第4章では、柔らかいシートの貼り付け工程、柔らかいフレキシブル基板に搭載された端子台を部品に自動で組み付けるカメラモジュールの工程など、パラレルリンクロボットを用いた熟練作業の自動化例 [3] について紹介する。

## 2. パラレルリンクロボットの構成

パラレルリンクロボットの構造は第1図に示すように、大きく2種類ある。実用化されているほとんどは、第1図左のDelta型と呼ばれる高速搬送を主目的とする3自由度制御のロボットである。これに対し筆者らは位置制御だけでなく、姿勢制御も必要となる複雑な作業を実現するために、第1図右の6自由度制御可能なHexa型を採用する。手で簡単に動かさず、手づたえによる教示を容易にする、独自のパラレルリンクロボットの構成について述べる。



第1図 デルタ型 (左) とヘキサ型 (右)  
Fig. 1 Delta type (left) and hexa type (right)

### 2.1 Hexa構造パラレルリンクロボットの仕様

ロボットの仕様を第1表のように決める。可搬質量は手づたえ教示をすることを想定し、ハンド部込みで1.5 kgまでとしている。また、可動範囲は、大きさ200 mm程度のワークに、作業をすることを想定し、 $\phi 400$  mm、上下150 mmまで対応する。

第1表 ロボットの仕様

Table 1 Specification of robot

| 項目   | 仕様                    | 単位            |
|------|-----------------------|---------------|
| 可搬質量 | 1.5                   | kg            |
| 可動範囲 | $\phi 400 \times 150$ | mm            |
| 振り角  | $\pm 30$              | °             |
| 繰返し性 | $\pm 20$              | $\mu\text{m}$ |

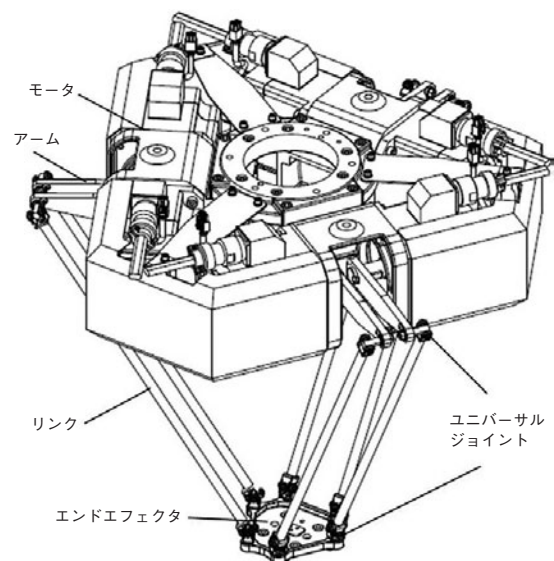
### 2.2 機構設計

Hexa構造のパラレルリンクロボットは、第2図に示すように、 $120^\circ$ ずつの3方向に、対向するモータ軸の対を構成する。これを6台のモータにより、6本のリンクを独立して駆動させる。

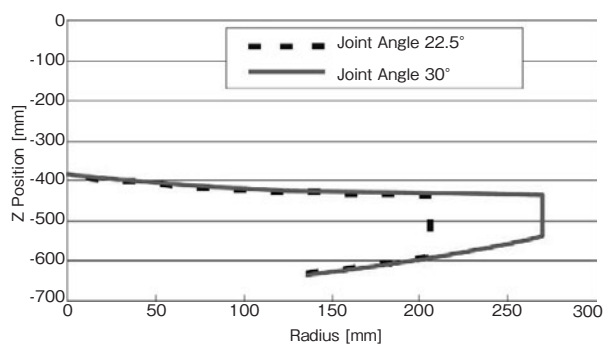
これら6本のリンクの角度により、先端のエンドエフェクタのXYZの並進3方向、ロール・ピッチ・ヨーの姿勢3回転の6自由度での動作を実現する。

各リンクを結ぶ関節には、球ジョイント方式とユニバーサルジョイント方式がある。球ジョイント方式では、一般に摩擦を伴う滑り軸受となる。24時間稼働の多い産業用ロボットでは耐久性が問題となる可能性が高い。一方、ユニバーサルジョイント方式では、転がり軸受を利用できるので耐久性が大幅に向上できる。ただし、ユニバーサルジョイントには振り角の限界があり、この限界がロボットの動作範囲とエンドエフェクタの振り角の限界に大きく影響する。

筆者らは第1表の可動範囲に対し、関節の振り角を考慮して、アーム長、リンク長を設計している。このときの可動範囲を、第3図に示す。縦軸はZ軸（上下方向）と、6個のモータの中心軸で構成される平面との交点を0として、下向きをマイナスで表示している。横軸はパラレルリンクロボットの鉛直中心軸を0として、半径方向を表示している。姿勢は水平のままの場合の可動範囲を示している。ユニバーサルジョイントの振り角が可動範囲の半径を決定するが、振り角を大きくしても高さ方向の可動範囲を確保できなくなる。今回は構造上の限界も勘案し、振り角を $30^\circ$ と決定し、ユニバーサルジョイントを



第2図 ヘキサ型パラレルリンクロボット  
Fig. 2 Hexa type parallel link robot



第3図 可動範囲 (半径)  
Fig. 3 Movable area radius

設計している。

### 2.3 手づたえ教示を容易にする独自機構

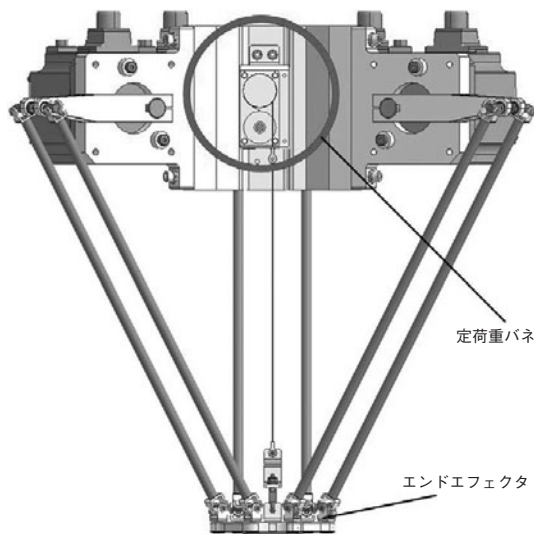
モータは制御の安定性を確保しつつダイレクトドライブを実現するため、軸慣性が大きなモータを採用している。また、最高回転数を低くしつつも、最大トルクが大きい仕様としている。これにより安定なダイレクトドライブが実現し、ギアを介さず駆動が可能となったため、容易に手づたえ教示ができるようになっている。モータの仕様を、第2表に示す。

第2表 モータの仕様

Table 2 Specification of servo motor

| 項目       | 仕様                  | 単位                |
|----------|---------------------|-------------------|
| 最大トルク    | 10.4                | Nm                |
| 回転数      | 100                 | min <sup>-1</sup> |
| ロータイナーシャ | 8.3×10 <sup>4</sup> | kg・m <sup>2</sup> |
| エンコーダ    | 20                  | bit/round         |
| 出力       | 40                  | W                 |

また、ロボットのエンドエフェクタに最大積載1.5 kgを搭載した場合、特に女性作業者がこの重量を支持しながら、微妙な熟練作業をするには難しい場合がある。そこで、第4図に示すような、定荷重バネによりエンドエフェクタを吊り上げることで、手への重量分の負荷を低減している。ロボットの実作業中は、動作抵抗となるため、この定荷重バネは外している。



第4図 定荷重バネとエンドエフェクタ

Fig. 4 End effector suspended by constant force spring

## 3. 手づたえ教示

熟練作業でも容易に定量化でき、垂直立ち上げを可能とする手づたえ教示データについて、簡単に作成する方法および作成したデータの編集機能に関して述べる。

### 3.1 手づたえ教示データの作成

変種変量生産での組立に対応するため、多くの機種に対し、複雑な作業を容易にロボットに教示できる必要がある。

従来のロボット教示作業は、一般的にティーチングペンダントを持ち、イン칭ングやポイント教示にて、作業が変更されるごとにそのデータを作成しておいていた。よって、次章で述べる柔軟物を操作するような繊細な動作の教示は非常に難しく、時間のかかる作業であった。また、その教示データ作成には、教育訓練されたロボット作業が必要であった。それに対し、手づたえ教示は、エンドエフェクタを手で持って、動かしたい場所に持っていくだけで良い。教育訓練されたロボット作業ではない、組立を実際に行っている熟練作業者が、教示データをごく簡単にスピーディに作成できる。

垂直多関節ロボットのエンドエフェクタを手で直接操作すると、その小さい動きであっても、一意的に6箇所の関節角度が決まるため、アームが大きく動いてしまい危険な場合がある。また、ロボットを力制御したり、モータ電源をオンした状態でなければ、エンドエフェクタを手で動かす動作は困難である。よって、万一暴走したときの安全性が確保できない。それに対し、吊り下げ型のパラレルリンクロボットでは、各リンクは軽量であり、



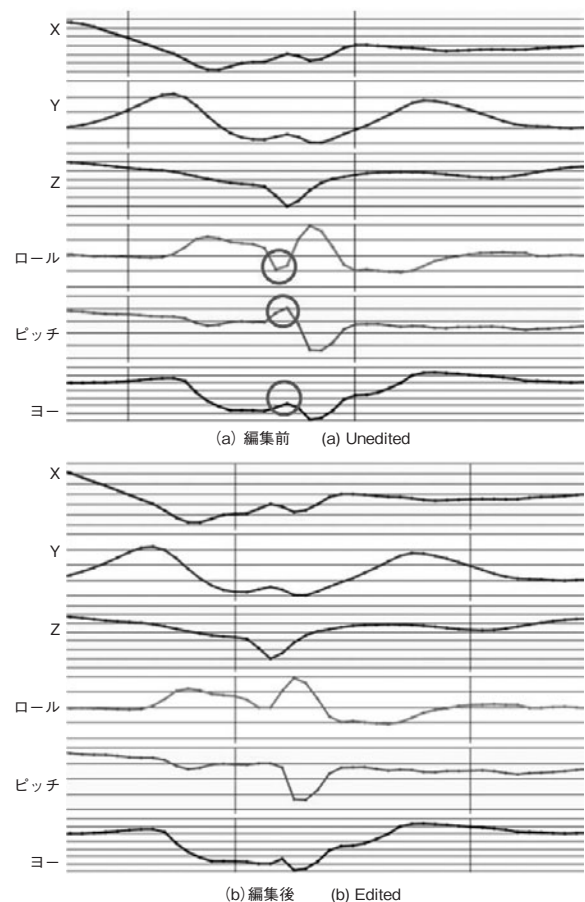
各アームの動きは小さく安全である。それゆえ、途中の関節の動きを考えずに、エンドエフェクタの位置・姿勢だけを操作することができる。また、可動部が軽量であるため、モータの動力電源を切った状態で、エンコーダ情報を記録できるので、安全な手づたえ教示が実現できる。

また、第2.3節で述べたように、動作抵抗が大きくなり、手づたえ教示の操作感を悪化させるギアをやめ、低速・高トルクの特種なモータを採用しダイレクトドライブを実現し、軽く教示ができる構造としている。さらに、定荷重バネを用いることで、女性作業者でも軽快に手づたえ教示することが可能となる。

教示データのサンプリング周期は、特定時間間隔で、6台分のモータのエンコーダ情報を記録している。記録の際には、位置補正や、編集を容易にするために、エンコーダ情報から順運動学計算を経て、エンドエフェクタの座標・姿勢情報に変換し保存している。ロボットに教示の動作を再現させる際に、再生周期を記録時のサンプリング間隔の時間を調整することで、低速再生や倍速再生などを実現している。これにより、低速で丁寧に手づたえ教示し、再生時には高速に動作させることで人よりも短時間でロボットに作業をさせることができる。

### 3.2 教示データ編集機能

実際に手づたえ教示を行うと、人の手で行うため移動の際の無駄な軌跡やフラツキが発生する。こういう場合でも、無駄な動作を排除するため、手づたえ教示した内容を、直感的かつ容易に編集できる機能が必要である。筆者らは動画の編集機能のような直感編集を目指し、第5図にあるような編集ソフトウェアを開発している。時系列で6自由度の座標をグラフ表示し、途中の通過座標を変更できる。図中 (a) は編集前の座標の変化を示している。この例では、時間軸中央付近のロール・ピッチ・ヨーが一部極端に変化している。ロボットの動作上、この極端な変化が必要でないならば、編集機能を生かして図中 (b) のように、滑らかな曲線となるように編集する。手づたえ教示の場合、このように無駄な動作も再現し、タクトタイムを悪化させる可能性があるためである。この編集機能により、より簡単に狙い通りの教示作業が可能になる。



第5図 軌跡の編集

Fig. 5 Editing of track

## 4. 熟練作業の自動化例

国内では、柔らかいシートの貼り付け工程や、デジタルカメラの組立など、手づたえ教示の機能を用いて実現している。それらの事例に関して紹介する。

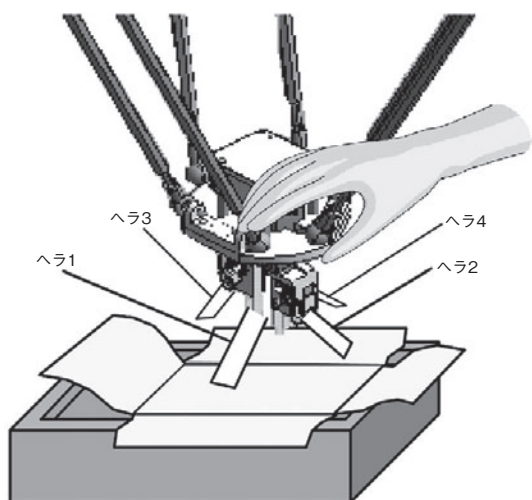
### 4.1 シート貼り付け工程

柔軟複雑形状のシートを、ハンディ端末の内壁に貼り付ける工程に、パラレルリンクロボットを導入している。作業による複雑なシート材貼り付けは作業時間が長く、熟練度により1枚3～6分のフラツキがある。そこで、第6図のようにヘラの動きを手づたえでロボットに教示する。

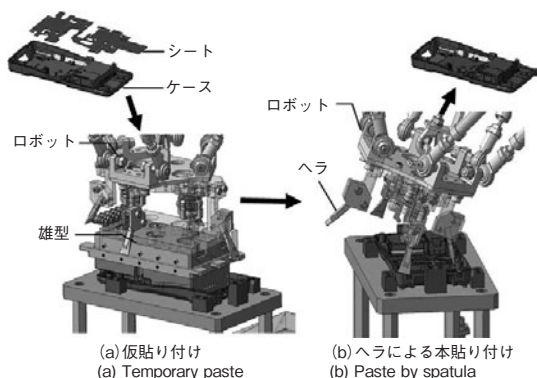
次に第7図に示すように、エンドエフェクタ部に装着したヘラを動作させ、シート貼り付けの自動化を行う。

作業者は、雄型の治具に位置決めピンを利用して、シートを配置する。そして、シートの剥離紙を剥がす。

ロボットによる作業は、第7図 (a) のように雄型を着脱可能なワンタッチジョイントにより、エンドエフェク



第6図 手づたえ教示  
Fig. 6 Direct teaching



第7図 シートの貼り付け工程  
Fig. 7 Process of sheet paste

タ部に接続する。雄型でシート材を貼り付けの対象ワークである筐体（きょうたい）に仮貼り付けし、その後、雄型をロボットの可動範囲内の端にあるツールホルダに戻す。

第7図 (b) のようにエンドエフェクタ部に装着した4本の樹脂製のヘラを切り替えながら、筐体内壁に複雑な形状に沿わせて本貼り付けを行っていく。

本貼り付け作業はエアの嚙（か）み込みやしわを抑制するように配慮して教示している。手づたえ教示は約20パターンの軌道を組み合わせて構成している。

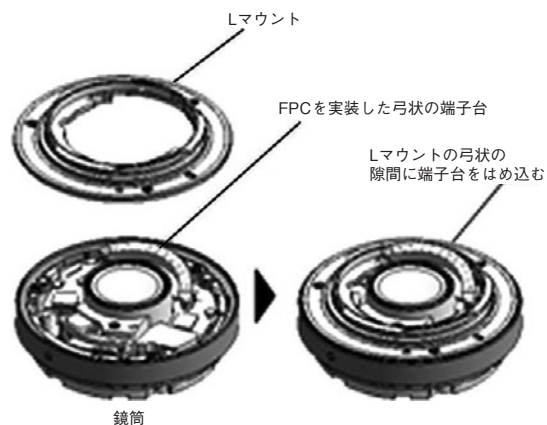
熟練作業者でも3分程度要する作業であるにもかかわらず、本ロボットシステムにより、安定的に1.5分で貼り付け作業が可能になっている。また、品質の安定も実現できている。

#### 4.2 カメラモジュールの組付け工程

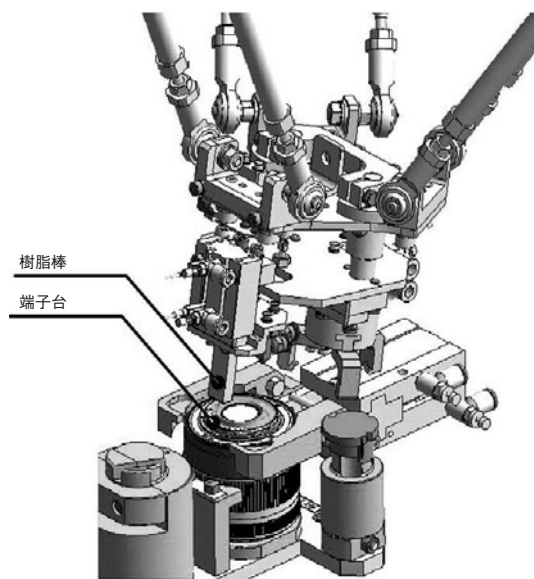
デジタル一眼カメラの交換レンズ鏡筒組立の自動化例を示す。部品の例を、第8図に示す。図中左上のLマウントと呼ばれる部品を図左下の鏡筒に組み付け、鏡筒内でフレキシブル基板（FPC）に搭載された端子台を、このLマウントの弓状の隙間にはめ込む作業である。

この作業を自動化する工程を開発する。Lマウントを組み付け、それをチャックにより固定する。第9図に示すように、樹脂の棒を用いて、Lマウントの内側に不安定な端子台を熟練作業者のようにスムーズにはめ込む。その後、端子がはめ込まれた後にできた隙間に遮光枠を組み付け、次工程に移す。

この端子台は柔軟物であるFPCの上に実装されている



第8図 組み付け対象  
Fig. 8 Assembly parts



第9図 ロボットによる組立工程  
Fig. 9 Assembly process by robot

ので、位置が不安定であるため人手で組み付けされていた。また、狭い隙間の中で端子台をはめ込む工程は、習熟するまで時間がかかる作業であった。

今回6自由度の柔軟な動作をパラレルリンクロボットに実行させることにより、熟練作業を自動化することができている。

## 5. まとめ

熟練作業の自動化のため、ロボットの教示を容易に実現できる6自由度制御可能なパラレルリンクロボットを開発した。

- 1) モータの電源を切った状態で、ロボットのエンドエフェクタを直接手で持って動作を教示する手づたえ教示機能を開発し、安全で、容易に作業の教示ができるようになった。
- 2) ダイレクトドライブと定荷重バネによる吊り下げ機構によりロボットのエンドエフェクタをより軽く、小さい力で動かすことができ、繊細な動作を教示することができるようになった。
- 3) 教示の編集機能を開発し、手づたえで教示した軌跡データを直感的で容易に修正や調整ができるようになった。
- 4) シート貼り付け工程、カメラモジュール組立など、各工程への導入を実現した。

これらの開発により、これまで人手でなければできなかった熟練作業の自動化が可能となった。汎用ロボットであるため、製品の専用部分への投資が最小化できる。また、手づたえ教示により短時間で複雑な作業をプログラミングでき、多品種の場合でも生産の垂直立ち上げが容易になった。

今後も、使い勝手をさらに向上させ、人でなければできなかった作業の自動化を実現し、国内外の社内工場への展開を拡大する予定である。

## 参考文献

- [1] フランソワ・ピエロ 他, “6自由度パラレルロボットの設計,” 機械の研究, 第44巻, 第2号, 1992.
- [2] 内山勝 他, “6自由度高速パラレルロボットHEXAの開発,” 日本ロボット学会誌, vol.12, no.3, pp.117-124, 1994.
- [3] 藤原茂喜 他, “パラレルリンクロボットを用いたマシンセルの進化,” ロボット, vol.205, pp.24-27, 2012.

## 執筆者紹介



藤原 茂喜 Shigeki Fujiwara  
モノづくり本部 生産技術開発センター  
高度生産システム開発センター  
Advanced Production System Development  
Center, Production Engineering Development  
Center, Global Manufacturing Div.  
博士 (工学)



高野 健 Ken Takano  
モノづくり本部 生産技術開発センター  
高度生産システム開発センター  
Advanced Production System Development  
Center, Production Engineering Development  
Center, Global Manufacturing Div.



末藤 伸幸 Nobuyuki Suefuji  
パナソニック システムネットワークス株式会社  
グローバルマニュファクチャリングセンター  
Global Manufacturing Center, Panasonic System  
Networks Co., Ltd.