

パラレルメカニズムと建設施工技術への応用

五 嶋 裕 之

本報では、パラレルメカニズムと呼ばれる多自由度運動を実現する空間リンク機構について、筆者がこれまで行なってきた研究開発事例、今後の建設施工技術応用への展望を述べる。これまでの研究開発事例は、従来の機構を単純にパラレルメカニズムで置き換えたものが多い。パラレルメカニズムは、既に実用化されている機械システムに適用するのではなく、パラレルメカニズムの特徴を活かした新たな機械システムデザインの実現に使われるべきである。ここでは、パラレルメカニズムを用いた、新たな機械システム実現の具体的な事例を順次提示して行くとともに、最近の建設施工技術への応用事例について紹介する。
キーワード：パラレルメカニズム、多自由度、空間リンク機構、工作機械、ロボット

1. はじめに

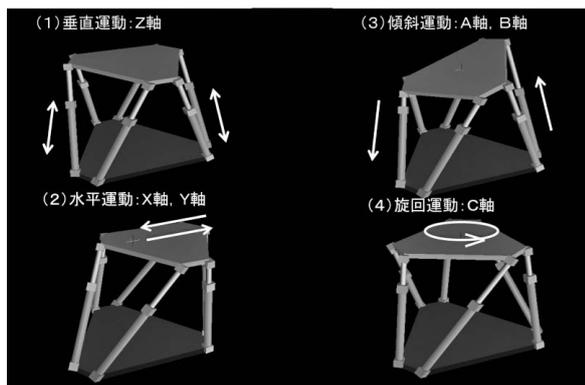
本報で取り上げるパラレルメカニズムは、工作機械やロボットマニピュレータに代表される機械システムの常識を覆す可能性を持った、イノベーション技術の一つであると考えられる¹⁾。パラレルメカニズムは機構学的には、出力となるリンク（ロボットではエンドエフェクタ）を複数の駆動用リンク列（連結連鎖）により並列に駆動する機構の総称である（図—1参照）。これに対し、従来のロボットマニピュレータや工作機械の機構、すなわちリンクが直列に連鎖した機構をシリアルメカニズムと呼ぶ。パラレルメカニズムを用いた産業機械システムとして、フライトシミュレータ、工作機械、マニピュレータ、多自由度位置決め機構など、既にいくつかの事例が知られている。しかしながら、これまでの応用では、従来の機構を単純にパラレルメカニズムで置き換えたものも多く、パラレルメカ

ニズムの特徴を十分理解したうえで、目的や仕様に応じた適切な設計（デザイン）が行われているとは言えない。パラレルメカニズムは、既に実用化されている機械システムに適用するのではなく、メカニズムの特徴を活かした新たな機械システムデザインの実現に使われるべきである。本報ではパラレルメカニズムを用いた、新たな機械システム実現の具体的な事例を提示するとともに、今後期待される建設施工技術への応用について紹介する。

2. 工作機械の精度測定システム

高精度の工作機械では、正確な形状創成運動が必要になる。一般のマシニングセンタ（以下MCとする）は、工作機械の構造上の幾何学的な誤差、変形その他、サーボ系の誤差などによって、形状創成運動の精度が低下する。このため、個々の工作機械の運動精度を測定し、性能の把握と運動精度の管理を行い、必要に応じて調整を行うことが非常に重要になる。MCの運動精度を評価する試験方法として、ISO規格に規定される位置決め精度試験、円運動試験（Double Ball Bar：DBB）が、広く活用されている。しかしながら、これまでの測定方法の多くは、MCの空間運動精度の評価には十分ではない。

そこで本研究では、これまで実現することが困難であった、種々の三次元軌道に対するMCの運動測定が可能なる、パラレルメカニズムを用いた新しい運動精度測定システムを提案した²⁾。図—2に提案する測定



図—1 六自由度パラレルメカニズムの概要

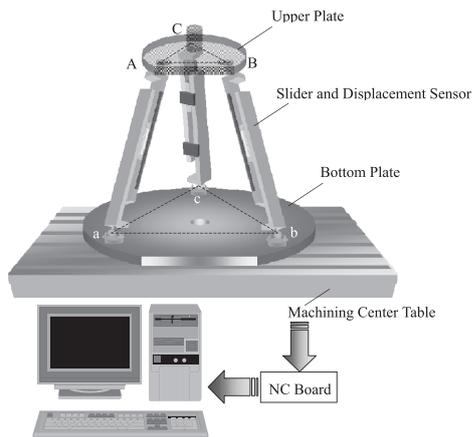


図-2 工作機械の精度測定システム

システムの概略図を示す。測定機は、MC のスピンドルにコレットチャックを介して固定される上部可動プレートと MC のテーブルに固定する下部ベースプレートを自由に伸縮可能な三本のスライダで結合した一種の平行メカニズムで構成されている。この測定機を取り付けて MC を運転すると、スピンドルとテーブル間の X, Y, Z 方向の位置が相対的に変化し、これに伴って二つのプレート間に取り付けられた三本のスライダ長も変化する。このとき、三本のスライダ長から、スピンドルとテーブルの相対的な位置関係を一意に決定する関係式を導出することができる。従って、この関係を用いれば、平行メカニズムの三本のスライダに変位計を組み込むことにより、MC の運転中に測定されるスライダ長から MC の運動経路を求めることが可能になる。この方法は、これまで測定不可能であった任意の軌道における精度測定が原理的に可能であることから、工作機械及びロボットなどの精度測定に有用であると考えられる。

3. 三次元曲げ加工システム

長尺材として一般的な金属管は、約 2000 年前に古代ローマ水道に鉛管が用いられて以来、各種流体の輸送用配管として広く利用されている。20 世紀に入り、金属管は自転車のフレームに代表される機械・構造物の要素としても用いられるようになった。現在金属管材は、曲げなどの二次加工がなされ、配管部品や機械構造部品として産業界で広く利用されている。管材は、重量に対して曲げ剛性やねじり剛性が高いため、軽量化や省資源、コスト低減に有利であると考えられている。

金属管材の単純な形状の曲げ加工については、これまでに多くの加工法、加工機が実用化されている。代

表的なものに、回転引き曲げ、プレス曲げなどがある。これらの加工は、素材を塑性変形させて金型の形状を金属部分に転写する方法であり、大量生産には優れている。しかし、管材の断面形状や曲げ半径に合わせて多数の型を製作しなければならないため、多品種少量生産では高コストとなる。さらに曲げ半径が連続的に変化するような曲げや、ねじりを含む複雑な三次元形状の曲げを行うことは困難である。この問題を解決するため、引抜き型によって管を拘束しながら曲げ加工を行う、押し曲げ加工法が提案された³⁾。押し曲げ加工法は引抜き型の位置を CNC 制御することで、曲げ半径が連続的に変化する三次元曲げが可能であるという特徴を有する。

そこで本研究ではこのことに着目し、押し曲げ加工における可動金型の駆動に平行メカニズムを用いることにより、従来の押し曲げ加工機に比べシンプルな構造で任意の三次元形状に加工が行えるという特徴を持つ、管材など、長尺材の曲げ加工システムを実現しようとするものである。提案する曲げ加工機の概観を写真-1 に示す。写真-2 に示すような加工実験を行い、試作した加工機の加工能力の評価を行った。曲げ実験はアルミ管材を使用して、単純曲げ（U 字曲げ）、二回曲げ（S 字曲げ）、螺旋曲げ、三次元曲げなどを実施した。写真-3 に示すようなねじりのない円管の加工であれば、三次元曲げであっても容易に加工ができる。

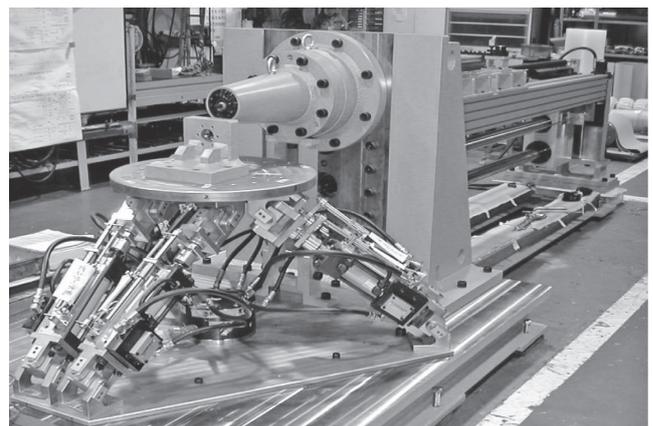
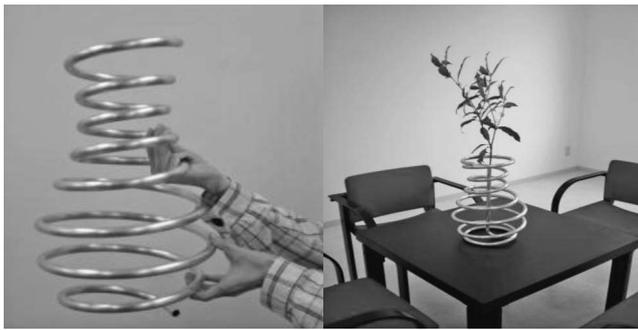


写真-1 三次元曲げ加工システム



写真-2 三次元曲げ加工の一例



写真一三 三次元曲げ加工の応用製品

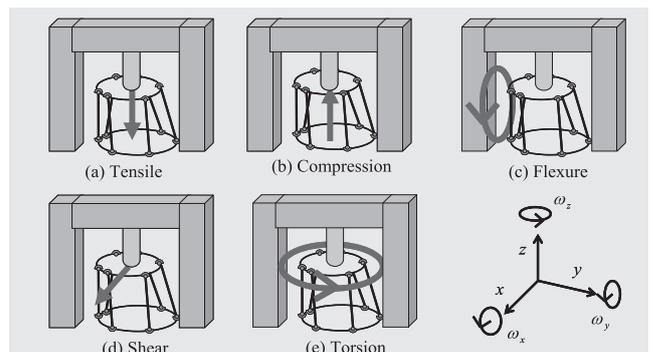
4. 多軸材料試験システム

強化繊維と樹脂を結合した新しい複合材料では、強化繊維の方向と荷重方向の組み合わせにより機械的性質が全く異なり、素材の材料特性把握が難しいという問題がある。またこれらの新素材では、リベット、ボルトやねじによる締結といった機械的接合が困難であるため、接着接合が多用される。接着接合は、構造軽量化、高減衰特性など、機械的接合にくらべてすぐれた機能性を持っている。しかし、接合部の力学的特性は、構成材料の機械的性質や、接合部の幾何学的形状だけでなく、接合界面の物理化学的性質、さらに接着剤の硬化過程など、広い範囲の因子の影響を受けるため非常に複雑になる。したがって、このような新素材や接着接合などの複雑な機械的特性を把握するためには、多方向の荷重を単独、あるいは同時に付加することができる自由度の高い多軸材料試験機が必要である。しかしながら、材料や部品の機械・物理的特性を評価する試験機として広く普及している万能材料試験機は、荷重を加える駆動軸が一方(単軸)に限られ、より実用条件に近い多方向(多軸)の複合力や、ねじり等の力を加えるような試験に対応できず不十分である。この問題を解決するためには、複合素材や接着接合を含む部品に対応した、新しい試験システムの開発が必要である。

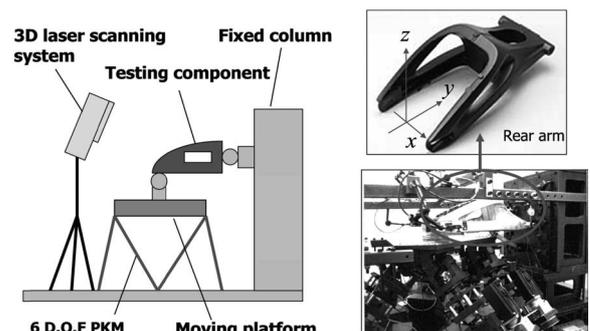
本研究では、パラレルメカニズムのコンパクトに多自由度機構を実現できるという特徴を活かし、同時多軸制御による六軸の位置・力制御を行う試験機を考案する⁴⁾。この試験機を使用することで、従来は困難であった、実用条件に近い多方向の複合負荷による試験を行うことが可能となり、より自由度の高い材料試験システムを実現することができる。図一三に提案する試験システムの概要を示す。通常万能材料試験機では、クロスヘッドに固定した試験材料を、ヘッド部を一定速度で動かすことで荷重を付加し、ロードセルにより荷重測定を行うことが基本である。本システム

では、ヘッド部に六自由度のパラレルメカニズムを設置することで、試験材料に多方向の荷重を単独あるいは複合して付加することで試験を行い、同時にトルクを含む六軸の荷重測定を行うことを基本としている。

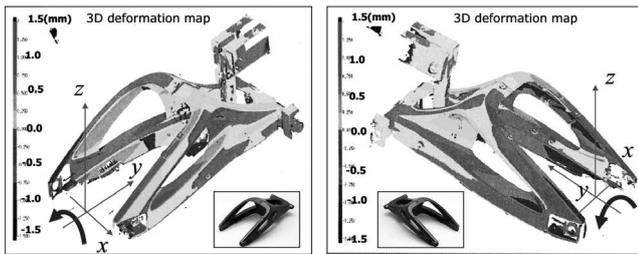
提案する多軸材料試験システムを用いて、二輪車の主要コンポーネントであるリヤアームの試験を行った結果の一例を示す。図一四に示すように、提案する試験システムは、六自由度の動作が可能なパラレルメカニズム本体、試験対象となる部品を固定するコラム、部品の変形量を計測する非接触3Dレーザスキャナで構成される。本事例のリヤアームは三次元的に複雑な形状であり、部材の肉厚も一定ではない。また、溶接による接合やハイドロフォーミングによる成形などの工法により、CAEシミュレーションも精度が十分で無いことが問題となる。図一五はリヤアームに対してねじりを加え、その時の変位量を3Dレーザスキャナで計測し、変位量の大きさをカラーマップとして三次元的に表示した結果である。3Dレーザスキャナの測定分解能は、現状数十マイクロメートルと接触式に比べ十分ではないが、三次元のカラーマップとして表示することで、三次元的な変形の詳細を把握することができる。測定結果を参照すると、部材の一部に局所的に変形量が多い部分が見られ、応力集中が発生していることがわかる。本試験システムの場合、適切な固定治具を使用することで、一度のセッティングにより多方向の曲げ、ねじりによる複合荷重試験が実施できる



図一三 多軸材料試験の概要



図一四 二輪車リヤアームの多軸材料試験



図一五 多軸材料試験結果

ため、試験時間の大幅な削減が期待できる。

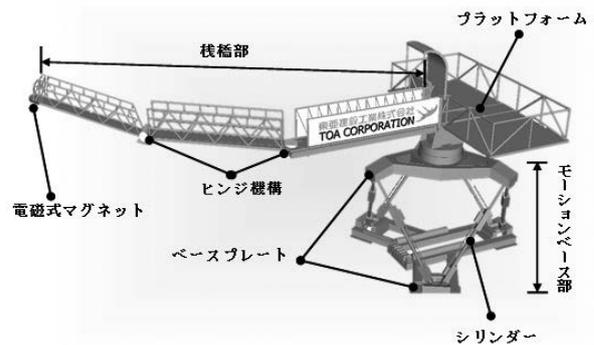
5. 建設施工技術への応用

コンテナターミナルや発電所、各種プラントが集結する港湾の埋立地の造成には、作業船による大規模施工が不可欠である。洋上の浮体構造物は、波や風の影響を受けて動揺する。洋上施設との移動には一般的に交通船が用いられるが、高波浪時は交通船が大きく動揺するため海中転落や挟まれ事故のリスクが高まり、移動の制約による作業効率の低下が大きな課題となっている。近年注目されている洋上風力発電、メタンハイドレートなどの海洋資源開発海域では、より厳しい波浪環境となることが予想され、船舶から浮体構造物への安全な乗降手段の提供は効率の良い建設施工を実施するため解決すべき緊急の課題の1つと考えられる。

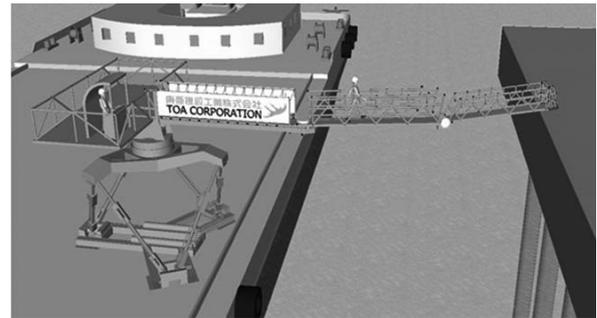
この課題に対しパラレルメカニズムを応用した新たな取り組みとして、「動揺吸収型可動式棧橋」の研究・開発が提案されている⁵⁾。具体的なシステムは図一六に示すように、浮体構造物や船舶の動揺を打ち消すように動作する六自由度のパラレルメカニズムモーション機構、センサー、カメラなどセンシング技術および制御に必要なソフトウェアなどから構成される。センサーによって測定される船舶の動揺を打ち消すように、各々のシリンダーを適切に制御することで、高波浪で船舶が動揺した場合でもプラットフォーム上に固定された棧橋を常に水平・定位置に保つことが可能である。パラレルメカニズムの特徴を活かした新たな機械システムデザインとして非常に興味深く、今後の研究開発の成果が期待される。

6. おわりに

本論では、パラレルメカニズムと呼ぶ多自由度運動を実現する空間リンク機構に着目し、この機構の機械システムへの応用研究を行った事例と今後の建設施工技術への応用について述べた。本内容が、パラレルメカニズムが起こす新たなイノベーションについて、読



図一六 動揺吸収型可動式棧橋



図一七 可動式棧橋の運用イメージ

者の参考になれば幸いである。

謝辞

最後に、動揺吸収型可動式棧橋に関し情報を提供いただいた、東亜建設工業(株)、(株)工苑の関係各位にお礼申し上げます。

J|C|M|A

【参考文献】

- 1) 特集:パラレルメカニズムが機械を変える, 日経メカニカル, 日経BP社, No.450, pp.26-49, 1995
- 2) 中尾陽一, 五嶋裕之, 山下千明: パラレルメカニズムを用いたマシニングセンタの運動経路測定法 (第1報, 測定法と測定実験), 日本機械学会論文集C編, Vol.68, No.676, pp.277-283, 2002
- 3) 五嶋裕之, 田中豊, 一柳健: パラレルメカニズムを用いた曲げ加工機による管材の三次元加工, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.41, No.4, pp.74-79, 2010
- 4) Hiroyuki GOTO, Yutaka TANAKA: A Multi-Axial Materials Testing for Advanced Composite Materials Using Parallel Kinematics, Proceedings of the 13th International Conference on Mechatronics Technology (ICMT2009), CD-ROM (ISSN No.2094-330X), 2009
- 5) 「動揺吸収型可動式棧橋」の開発に着手, 東亜建設工業(株), プレスリリース, 2014
<http://www.toa-const.co.jp/company/release/2014/140219.html>

【筆者紹介】

五嶋 裕之 (ごとう ひろゆき)
一般財団法人機械振興協会
技術研究所
産学官連携センター長代理

