

ImPACT タフ・ロボティクス・チャレンジにおける 災害対応建設ロボット

吉 灘 裕

内閣府総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）タフ・ロボティクス・チャレンジでは、災害対応を目的とする建設ロボットの開発を進めている。これは従来の油圧ショベルの機構・システムを原点から見直し、その運動性能を飛躍的に向上させて、より高い災害現場への適応性と作業の自在性の実現を目指したものである。現在そのプロトタイプロボットが完成し、評価実験を進めている。本稿ではその概要を紹介する。

キーワード：ImPACT，災害対応，建設ロボット，遠隔操作，力覚・触覚，ドローン，俯瞰映像

1. はじめに

災害対応にロボットを導入する試みは広く行われている。ただし実際の災害現場で十分に機能を発揮した事例は多くない。それは現在のロボットを災害環境下へ適応すると、「現場で動けない」、「現場の状況が不明」、「失敗すると全体が破綻」、「作業条件が合わない」等の問題点が露わになるためと考えられる。内閣府総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）タフ・ロボティクス・チャレンジ（プロジェクトマネージャー：田所論東北大学教授）¹⁾は、これらの課題を解決した、災害などの極限環境下において活動できるタフでへこたれない「タフロボット」の実現を目指した研究開発プロジェクトである。現在、5つのロボットプラットフォームの研究開発が進められているが、そのひとつが本稿で紹介する建設機械技術をベースとした「災害対応建設ロボット」である。

建設機械は、土砂災害や建物の倒壊などの幅広い災害現場で用いられている。建設機械自体は、一般の災害対応ロボットと比較して圧倒的にタフと言えるであろう。しかし不安定な瓦礫を崩れないように撤去する、あるいは被災車両のドアを開けるといった繊細な作業は苦手で、災害現場でのそのような作業は人手に頼らざるを得ないのが現状である。また比較的高い不整地の走破性能を有しているが、災害現場に多く見られる急傾斜地や泥濘地への適応性は必ずしも十分ではない。さらに建設機械オペレータの二次被災の危険を考慮すると、機械は遠隔で操作することが望ましい。

無人化施工など、建設機械の遠隔操作の取り組みが行われているが、搭乗操作時と比較して、作業効率が大幅に低下することが課題とされている。本研究開発では、現行の油圧ショベルの機構や油圧、制御、操作のシステムを原点から見直し、運動制御特性、遠隔操作性を飛躍的に向上させた災害対応建設ロボット（以下「建設ロボット」）を実現することを目標としている。

2. ImPACT タフ・ロボティクス・チャレンジの建設ロボット

ImPACT タフ・ロボティクス・チャレンジの建設ロボットでは、以下の3つの研究課題の実現を目標としている。

課題1：力持ちで繊細・器用な作業性を持つ機械の実現

課題2：高い対地適応性の実現

課題3：遠隔操作性の飛躍的改善

これらの課題を解決するために、本研究開発では、以下の新しい機構とシステムの開発を進めている。

(1) 2重旋回・複腕機構

ナイフとフォークで食事をするように、人間はほとんどの作業を両腕で行う。ロボットも2本の腕を与えることで、作業の自在性が1本腕のロボットに比べて飛躍的に高くなる。一般に2本腕というと、人間のように体の両脇に腕がついた右腕・左腕の構成がイメージされる。これまでに開発された複腕のロボットも、

ほとんどがこの構成を取っていると言ってもいいであろう。しかし機械システムを考える場合には、必ずしも人間を規範とする必要はなく、もっと自由な発想を取り入れることができる。本ロボットでは「2重旋回・複腕機構」を採用しているが、これは腰から2本の腕が生えているという構成である。人間も重たいものを持つときは腰を使うように、腰部に腕があることで重負荷への対応能力がきわめて高くなる。また右腕・左腕という概念を捨てて、「上腕」・「下腕」の構成を採用している。この構成では、2本の腕が上下に配置され、しかもどちらの腕も360°エンドレスに回転することができる。こうすることで両腕のレイアウトを自由に設定でき、またロボットのどちらが前方でどちらが後方かという区別もなくなる。生物ではあり得ないロボットならではの機構である。

2重旋回・複腕機構は、図-1のように左右の腕の肩の旋回部を同軸上に重ねており、肩の関節が別々の軸上に配される機構に比べて、はるかに大きな直径のベアリングを使うことができる。またロボットの重心付近で両腕を支持しているので、ロボットの安定性が高いという特徴がある。この機構の採用により、本ロボットは大きな負荷への適応性が高く、重作業に適した構造となっている。また同軸上に配置されたそれぞれの腕が360°回転するため、両腕の向きを自由に変更することができる。本ロボットは、自由な方向に向

けることのできる腕で地面を支えながら、クローラで移動することが可能で、災害現場の厳しい環境への適応性が高い。例えば、急傾斜地や凹凸の激しい現場で、片腕で立木や地面の固定物を掴んでロボットを安定化させ、もう片方の腕でハンドリング作業を行うことが可能である。また腕とクローラを協調して動作させることで、大きな段差を乗り越えることもできる（図-2）。また両腕を同じ方向に向けて複腕の協調作業を行うことも可能だが、2重旋回の特徴を活かして、右腕・左腕の配置を入れ替えることができる。これにより、片腕にカッター、もう一方の腕にグリッパのように2つの腕に異なる機能を与えた場合、作業状況に応じて各腕に適切な機能を割り振ることができ、多様で

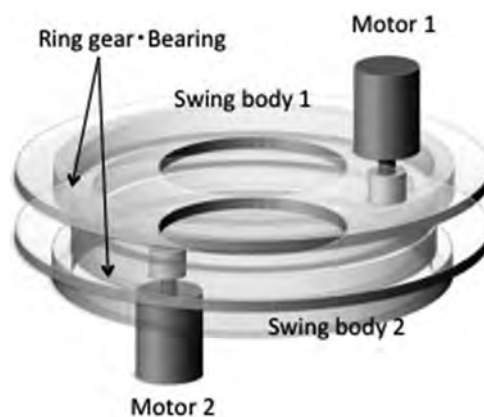


図-1 2重旋回機構

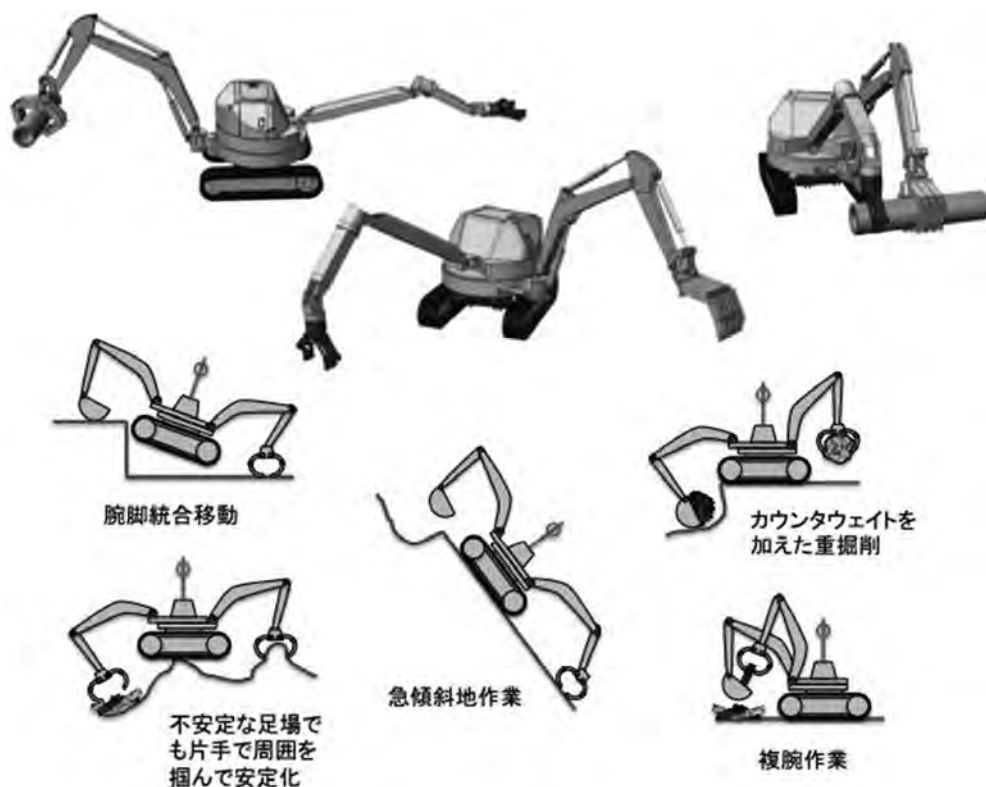


図-2 2重旋回・複腕機構の活用例

複雑な災害現場の作業に柔軟に対応することができる。

しかし腕が2本あっても、それらを自在に操ることができなければ、むしろ互いの腕が邪魔になってデメリットの方が大きくなってしまいう可能性が高い。この課題を解決するために本研究開発の建設ロボットでは、油圧システムの応答性を従来の建設機械よりも1桁高めるとともに、アクチュエータの摩擦特性を大幅に改善することにより、作業機の高い運動特性と力制御性を実現している。また力覚・触覚の機能を加え、対象物を壊さずに操作する繊細さと器用さを実現している。

(2) ロボット周囲情報の取得と新しい操作方式

遠隔操作時の作業性向上のためには、遠隔地の情報を可能な限りオペレータの周辺に再現することが望ましい。その代表的な研究としてテレグジスタンス²⁾があるが、システムが複雑となるため、発災直後の災害現場への搬送と設置が容易ではないことが考えられる。本研究開発では、可搬性に優れた遠隔操作コクピットの実現を目標としている。このため基本的に、画像提示と力覚・触覚の提示だけで操作システムを構成することを検討している。その条件の中で遠隔操作時の情報の欠落をできるだけ少なくするために、有線給電ドローンによるロボット周囲状況の把握、任意視点の俯瞰映像生成、煙や霧などの透過視、半隠消映像の生

成、音源探索などの研究開発を行っている。また複腕ロボットの多自由度の作業機を操作するために、直感性に優れた新しい操作システムの開発と、ロボットの動力学シミュレータを用いた操作トレーニングシステムの開発を行っている。これらにより現行の建設機械遠隔操作時の作業効率の低下（搭乗操作比50～60%）を飛躍的に改善することを目標としている。

図-3に建設ロボットを構成する技術を示す。また図-4に建設ロボットの災害現場への適用のイメージを示した。建設ロボットには、以下の11の研究チームが参画し、要素技術とシステム技術の開発を進めている。

- ①大阪大学 吉灘研究室
- ②東北大学 永谷研究室
- ③東北大学 昆陽研究室
- ④東京大学 浅間研究室・山下研究室
- ⑤神戸大学 横小路研究室
- ⑥東京工業大学 鈴森研究室
- ⑦東京工業大学・産業技術総合研究所 田中研究室
- ⑧慶應大学 石上研究室、横浜国立大学 尾崎研究室
- ⑨産業技術総合研究所 ヒューマノイド研究グループ
- ⑩産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター
- ⑪建機メーカ

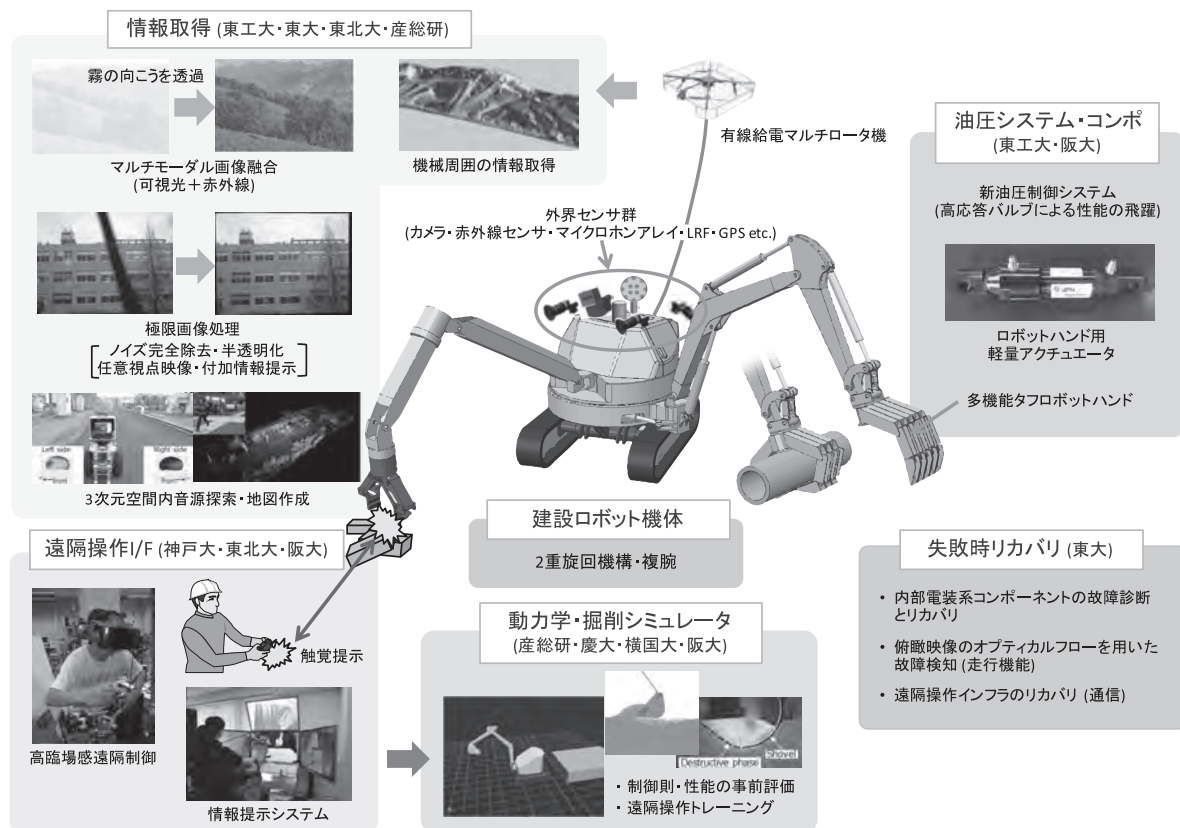


図-3 建設ロボットを構成する技術



図ー4 建設ロボット適用のイメージ

3. 建設ロボットプロトタイプ

建設ロボットは、本稿執筆の2017年10月時点で、2重旋回・複腕機構を備えたプロトタイプ機による1回目のフィールド実験を終え、その結果を踏まえて改良を進めている段階である。本章では、このプロトタイプ機の概要を紹介する。

(1) 2重旋回・複腕機構建設ロボット

写真ー1に2重旋回・複腕機構を採用した建設ロボットの外観を示す。開発したロボットは、車重2.5t、全幅1450mm、全高1900mm、クローラ全長1880mmである。駆動源には出力16kWのディーゼルエンジンを用いている。両腕はどちらも重負荷に対応しているが、上側の腕（アッパーム）はマニピュレータのような繊細かつ器用な作業用、下側の腕（ローアーム）は油圧ショベルのような掘削作業も可能な重



写真ー1 建設ロボットプロトタイプ機

作業用と異なる特性を与えている。

アッパームは、7DOF+グリッパの構成で、各関節のアクチュエータには、本研究開発で開発された低フリクションの制御性の高いものを使用している。オペレータへの力覚と触覚の提示機能を備えており、力覚は各シリンダの圧力から高精度に手先負荷力を推定し³⁾、力帰還型バイラテラルでオペレータに作業反力を伝達している。なお現在はグリッパにはバイラテラル制御は組み込まれていないが、これは次のステップで織り込む計画である。触覚は、ロボットアームの手首に取り付けた振動ピックアップにより、アームの触覚情報を振動信号として検出する。振動信号には、多様な振動が含まれるが、その中から接触に関する振動情報をリアルタイムで抽出し、オペレータに伝達する⁴⁾。オペレータへの触覚の提示は、リストバンドに取り付けた触覚ディスプレイを介して行われる。なお力覚、触覚ともに、手先部にセンサを組み込まない方式を採用しており、本ロボットのようなヘビィデューティな機械に適した方式となっている。ローアームは、現在5DOFで力覚・触覚の提示機能は持っていない。これは次ステップで7DOFとし、力覚・触覚も織り込む計画である。

(2) 多指タフロボットハンド

ローアームの先端には、本研究開発で開発された4本指のタフロボットハンドが装着されている⁵⁾。このハンドは、6個の油圧シリンダと2つの油圧モータで駆動され、これらのアクチュエータを動作させてハ



バケットモード



ハンドモード

写真—2 多指タフロボットハンド

ンドの形状を変更することにより、土砂などを掘削する「バケットモード」と、対象物の形に応じて4本の指で対象物を扱う「ハンドモード」に切り替えることができる（写真—2）。またハンドモードでは相手の形状に応じて握ることができ、握力は14 N～3000 Nの範囲で、自由に調整することが可能である。

（3）ロボット周囲情報提示

無人化施工などの建設機械の遠隔施工では、建設機械本体に搭載したカメラだけでは十分な映像情報を得ることが困難なため、専用のカメラ車を用意して、第三者視点からの映像情報を取得する工夫が行われている。しかし防災直後の災害対応では、カメラ車を自由に配置することは困難と考えられ、別の方法で第三者視点の情報を取得する必要がある。今回のプロトタイプロボットでは、以下のロボット周囲情報の提示技術を搭載している。

本ロボットでは、ロボット上に設けたヘリパッドに、マルチローター機（ドローン）を搭載している。このドローンに搭載したカメラにより、第三者視点の映像を取得することができる。ドローンは、ロボット本体からの有線による給電方式を採用しており、長時間の飛行が可能である⁶⁾。また給電ケーブルの繰り出し方向や張力から、ロボットに対するドローンの相対位置を、GPSを使わずに取得することができる。さらにケーブルを巻き取りながら着陸することにより、ヘリパッドへのピンポイントの着陸が可能である。もうひとつのロボット周囲情報提示技術として、ロボットに取り付けた複数の魚眼カメラの映像から、俯瞰画像を構成するシステムを搭載している⁷⁾。車体に取り付けた複数のカメラ映像を画像処理で合成して俯瞰画像取得する方法は、自動車などにも採用されており運転操作を容易にするものとして知られている。ただし自動車の例では、俯瞰画像の視点は一点に固定されており、変更することはできない。路上の駐車などの簡単な操作はそれでも十分であるが、災害現場のような複雑な環境下では、一方向からの俯瞰画像だけでは安全かつ確実に走行することは困難である。本研究開発では新しい画像処理アルゴリズムを開発して、ロボット本体に搭載した4個の魚眼カメラの映像を合成し、ロボットのオペレータに、任意視点からの俯瞰映像をリアルタイムに提示することを可能としている。これらのシステムを用いることにより、災害現場のような複雑な環境下でも、ロボット周囲の状況を分かり易く把握することができ、屋外のタフな環境でのロボットの遠隔操作を可能としている。

（4）遠隔操作システム

プロトタイプ機の遠隔操作には、昨年開発した単腕実験機のための遠隔操作コクピット⁸⁾を、複腕操作作用に拡張したシステムを用いている（写真—3）。操作インターフェースとして、アッパアーム、ローアームそれぞれの操作作用にハプティックデバイス2個、走行および旋回操作作用のフットペダル4個が設置されている。ロボットの作業機は、異構造のマスタースレーブを基本として操作され、前述のように力帰還型のバイラテラル制御が組み込まれている。またマスタレバーに3次元マウスとして操作できる機能を加えて作業機の全動作領域を有効に使うことができる。さらに作業内容に応じてマスタ操作からスレーブ動作への拡大比率を変更することが可能である。コクピットには、情報提示用として5つのディスプレイがあり、ロボットに取り付けたカメラ映像やドローンカメラ映像、俯瞰



写真—3 遠隔操作コクピット



写真—4 ピン嵌合作業

映像を適宜切り換えて提示する。また無線通信状況やロボット本体の姿勢角や圧力、油温などの情報も提示可能である。なお現在の操作システムは暫定版であり、映像提示システム、操作I/Fともに全面的に刷新した遠隔操作システムの開発を進めている。

ロボットと遠隔操作コクピット間は無線で通信が行われている。無線技術は、本研究開発の研究課題として掲げていないが、フィールドの実験環境では、5.7 GHz 帯（映像用・ロボット無線）、4.9 GHz 帯（操作信号）、5 GHz 帯・2.4 GHz 帯（情報通信）、特定小電力無線（エンジン始動停止・非常停止）などの専用および汎用の無線機器を組み合わせて使用している。

4. フィールド実験

2017年6月、東北大学青葉山新キャンパスに設けた災害現場を模擬したテストフィールドにて、1回目の評価実験を行った。今回は、ローアームに力覚が織り込まれておらず自由度も不足しているため、複腕の協調作業は行わなかったが、2重旋回などのロボットの基本性能および器用なアップアーム、パワフルなローアーム、それぞれの機能を確認するための実験を行った。ロボットの操縦は、ロボットから約50m離れた位置に遠隔操作コクピットを設置し、有視界は遮断して、ロボット搭載カメラやドローンカメラ映像、俯瞰映像のみを見て行った。アップアームについては、操作性を評価するためにピン嵌合作業を行った（写真—4）。ローアームでは、多指タフロボットハンドを用い、ハンドモードで瓦礫を除去し、その下の砂利を掘削する模擬作業を行った（写真—5, 6）。いずれの作業においても、期待どおりの作業性を示し、操作にそれほど習熟していなくても、比較的容易に作業が行えることを確認した。なおフィールド実験時の



写真—5 瓦礫把持



写真—6 土砂掘削

ピン嵌合作業では、かなりクリアランスの大きなピンと孔を使用した。その後のサーボ系、操作系の改善より、現在は50 μ m程度のクリアランスのピン嵌合作業が可能になっている。

5. おわりに

ImPACT タフ・ロボティクス・チャレンジ建設ロボットの研究開発において、2重旋回・複腕機構の建設ロボットのプロトタイプ機を開発した。プロトタイプ機にはまだ開発中の要素技術の一部しか搭載していないが、今後図—3に示す技術が順次搭載される計画であり、引き続きフィールドでの評価実験が計画されている。また、操作する自由度の多い複腕ロボットを、容易に操縦できる遠隔操作システムの開発を進めており、これらの技術の導入により、より実現場に近い環境での作業実験に進む計画である。

本研究は総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) により、科学技術振興機構を通して委託されたものである。

J C M A

《参考文献》

- 1) “革新的研究開発推進プログラム ImPACT タフ・ロボティクス・チャレンジのウェブサイト”, <http://www.jst.go.jp/impact/program/07.html>
- 2) 舘暲, “テレグジスタンス”, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.4, pp.215-221, 2015

- 3) 岡田大貴, 横小路泰義, 田崎勇一, 吉灘裕, 中村晋也, 倉鋪圭太, “多自由度油圧駆動ロボットのシリンダ圧力に基づく手先負荷力推定による力覚フィードバック”, ROBOMECH2017 予稿集, 2A1-P06, 2017/5
- 4) 竹之内栄人, 曹南, 永野光, 昆陽雅司, 田所諭, “建設ロボットの遠隔操縦支援のための高周波振動変調に夜触覚情報の提示”, ROBOMECH2017 予稿集, 2A1-P07, 2017/5
- 5) 井手徹, 難波江裕之, 廣田善晴, 山本明菜, 鈴森康一, “小型低撓動アクチュエータの開発と多指タフロボットハンドへの応用”, 第35回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2F1-04, 2017
- 6) Seiga Kiribayashi, Jun Ashizawa, Keiji Nagatani, "Modeling and Design of Tether Powered Multicopter", 2015 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, p. 57, (2015)
- 7) Wei Sun, Soichiro Iwataki, Ren Komatsu, Hiromitsu Fu-jii, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: "Simultaneous Tele-visualization of Construction Machine and Environment Using Body Mounted Cameras", Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2016), pp. 382-387, Qingdao (China), December 2016
- 8) 吉灘裕, 横小路泰義, 永谷圭司, 昆陽雅司, 山下淳, 田中正行, 大井健, “ImPACT タフ・ロボティクス・チャレンジ (TRC) 建設ロボット—単腕モデルによるフィールド評価実験”, ROBOMECH2017 予稿集, 2A1-P01, 2017/5

【筆者紹介】

吉灘 裕 (よしなだ ひろし)
大阪大学大学院 工学研究科
特任教授

