

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760155

研究課題名(和文) インピーダンス理論に基づく衛星捕獲ロボットのコンタクトダイナミクスと制御法の研究

研究課題名(英文) Dynamics and Control for Satellite Capture Robot based on the Impedance Theory

研究代表者 中西 洋喜 (NAKANISHI HIROKI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・研究開発本部・研究員

研究者番号：90361120

研究成果の概要(和文)：本課題は、コンタクトダイナミクスの定式化に立脚したフリーフライング宇宙ロボットを用いた衛星捕獲制御技術の確立を目的とする。ターゲットの力学的インピーダンス特性を適切に評価し、それに対しインピーダンス・マッチングを実現するように捕獲用ロボットアームを制御することにより、きわめて小さな衝撃力によるファーストコンタクトと、安定的な接触状態の実現する。

研究成果の概要(英文)：Contact is a critical phase in satellite capture because it involves the risk that the contact will push the target and robot away from each other. In this study, effective contact control methods based on the contact dynamics analyses were developed to prevent the target from being pushed and to maintain contact until the capture completed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学／知能機械学・機械システム

キーワード：ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

現在、人工衛星は我々の生活に欠かせないものとなっているが、宇宙開発に伴うスペースデブリ(宇宙ゴミ)の増加が、将来の宇宙開発活動への大きなリスクとして懸念されている。解決手段として宇宙ロボットを用いた軌道上サービスによる衛星のデブリ化防止・除去が期待されている。これらを実現する為のキーテクノロジーの一つが、軌道上での衛星捕獲技術であり、きく7号(日本)、Orbital-Express(アメリカ)等が軌道上での実証に成功している。しかしこれらはいずれ

も、専用の被把持機構を備え、位置姿勢をコントロールされた専用のターゲット(協力的ターゲット)に対するものであり、実際のサービスミッションで想定されるような、被把持機構を持たない非協力的ターゲットに対しては未だ成功例が無い。非協力ターゲット捕獲の大きな課題となっているのが、捕獲の際における安全な接触である。捕獲に伴う接触力によって把持が完了する前に双方が弾かれししまう恐れがあるが、上記の軌道上実証では、これを専用の把持・被把持機構を用いることにより回避しており、実際の非協力的

ターゲットに対する場合においては、接触力をコントロールし接触による弾き飛ばしを抑え、捕獲が完了するまで接触を維持する必要があるが、現状有効な解決策が無い状態である。

2. 研究の目的

本研究の最終目的は非協力ターゲット捕獲・接触時のコンタクトダイナミクスに対する正しい力学的理解と、それに立脚したインピーダンス制御の技術によって、接触力による弾き飛ばしを防ぎ、接触を維持し続ける手法を確立することである。研究代表者は過去の研究においてターゲットの力学的インピーダンス特性とロボットアームのインピーダンス特性の関係が、接触時の弾き飛ばしの有無を支配していることを明らかにしている。本研究課題では、ターゲットのインピーダンスを適切に評価し、それに対しインピーダンス・マッチングを実現するように捕獲用ロボットアームを制御することにより、安定的に接触状態を維持する手法について以下を明らかにすることを目的とした。

- 手先インピーダンス制御におけるむだ時間の影響の同定、および補正法の確立

手先インピーダンス制御は、ロボットアームの関節制御によって、手先が外力に対してあたかも質量-バネ-ダンパー系のように振舞う力制御の一種である。この質量-バネ-ダンパー特性を適切に選択することにより、浮遊ターゲットとの接触時にこれを突き飛ばすことなく、接触を維持することが可能となる。しかし、制御むだ時間が存在する場合、力入力から動作開始まで遅れが生じる為、接触力（力積）が増大してしまい、接触維持できないケースが存在する。特に宇宙ロボットの場合、搭載される演算装置は信頼性を重視するため、演算速度等のスペックは現状では十分に高速とは言えず、その影響は顕著となる。従って、現実のミッションを想定した場合、インピーダンス・マッチングを実現するには、むだ時間を考慮した補正が必須となる。本研究では、これらの接触条件とむだ時間の影響がインピーダンス制御およびコンタクトダイナミクスに与える影響の関係を明らかにするとともに、補正手法の確立し、むだ時間を含む実際のマニピュレータであっても、接触維持が可能であることを実証する。

- フリーフライン宇宙ロボットにおける手先インピーダンス制御の実現とターゲット把持システムの検討

インピーダンス制御による接触維持は数値シミュレーション及び、地上固定のマニピュ

レータでは確認されているが、実際の衛星捕獲ロボットのような浮遊ロボットにおいては未実証だった。特に、浮遊ロボットの場合は、アームの動作反力及び接触力によってロボット本体部が動くため、その動作も考慮した手先のコントロールが要求される。本研究では、実際の浮遊ロボットを構築し、ベースの動きに影響されずに慣性空間に対して手先インピーダンス特性が実現できることを実証する。さらに接触が維持されている間に速やかに把持を自動的に完了する手法についての検討も行う。

- コンタクトダイナミクスに基づく適応的なインピーダンス・マッチング制御法の開発

捕獲用マニピュレータの先端（ハンド）に実現される機械インピーダンスがターゲットのそれを下回るとき、安定的な接触状態の維持ができる。

しかしながら、過度な低インピーダンス制御は、制御系を不安定にし、捕獲作業に悪影響を及ぼすため、ハンドの仮想インピーダンスは突き飛ばしを起こさない条件の範囲内でできるだけ高くすることが望ましい。すなわち、ターゲットのインピーダンスと一致する状態（インピーダンス・マッチング）で作業を行うことが理想となる。このような制御を実現するためには、ターゲットの力学的インピーダンス（慣性パラメータ）が既知である必要がある。しかし、現実のターゲットはこれらのパラメータが未知もしくは不確定性を含む可能性が高い。このような場合においても、安全・確実にターゲットを捕獲するため、本研究課題では、適応的にインピーダンスをチューニングしながら安定な接触を継続する制御法の開発を行う。

3. 研究の方法

本研究は、微小重力模擬実験と数値シミュレーションの組合せを中心として進められた。

宇宙機のコンタクトダイナミクスは物体の材質・構造が複雑に影響するため、材料特性のみからはそのモデルを推定することは困難である。その為、実際にロボットやターゲットを浮遊状態で接触させる物理実験が必要不可欠である。空気浮上による微小重力模擬手法は有用な手法の一つであり、物体を空圧によってわずかに浮上させ、摩擦を0に近づけることによって、重力と垂直な方向に微小重力環境を模擬することが可能である。環境が2次元に制限されるが、実験室レベルでも精度の高い環境が得られる。本研究ではこの手法を用いてフリーフラインロボット（軌道上作業ロボット）およびターゲット衛

星の2次元テストベッドモデルを開発し、浮遊ターゲットと固定マニピュレータの接触実験（図1）、浮遊ロボットモデルと浮遊ターゲットの接触実験（図2）などを通じて、接触ダイナミクスモデル構築のためのデータ取得や、接触制御法の実証を行った。

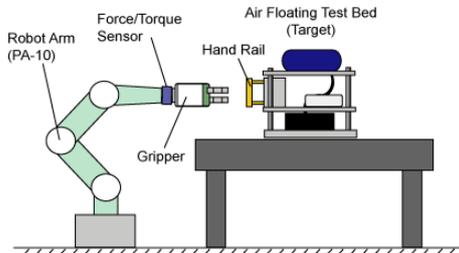


図1 ロボットアーム・浮遊ターゲット接触実験概念図

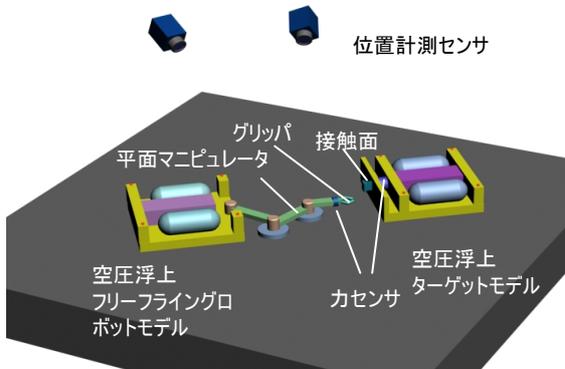


図2 浮遊ロボット・浮遊ターゲット接触実験概念図

4. 研究成果

(1) 空気浮上テストベッドの開発

本課題を遂行するにあたり必須となる、微小重力下の人工衛星及び、捕獲ロボットの動作を模擬する空気浮上テストベッドを開発を行った。ロボットは平面3自由度のマニピュレータを搭載し、ターゲットモデルは衛星表面を模した接触面を持ち、両者の接触力は力・トルクセンサによって計測される。また、実験中の両者の位置・姿勢は、赤外線反射式ステレオラベリングカメラにより計測される。また、光学マウスを応用した空気浮上テストベッド用ビジュアルオドメトリ装置、加速度センサ等の各種装置の実装も行った。さらにターゲット捕獲用の空気浮上2次元マイクロアームの設計・試作を行い、これを前述の空気浮上テストベッドに搭載した。これらのテストベッドについて初期動作確認実験として、宇宙用手先軌道追従制御を行い、

本テストベッド及び、計測システムが有効に機能することが確認された。本研究で開発した検証用空気浮上テストベッドを以下に示す。（図3：ロボットモデル、図4：グripper、図5：ターゲットモデル）

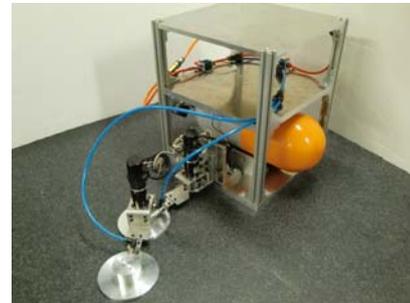


図3：ロボットモデル

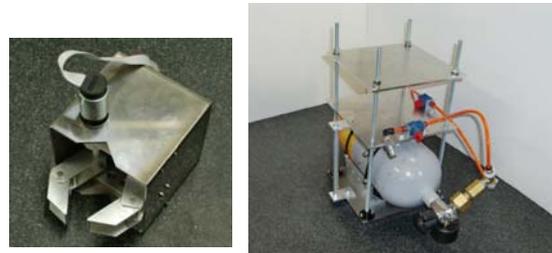


図4：グripper 図5：ターゲットモデル

(2) 手先インピーダンス制御におけるむだ時間の影響の同定、および補正法の確立

ロボットアームの制御むだ時間及び制御遅れは様々な要因によって生じる。これらが接触に与える影響を解析するにあたり、これらのモデル化を行った。手先インピーダンス制御をかけたロボットアームと、同等のインピーダンス特性を機構的に与えたロボットアーム（図6）を比較することにより、制御むだ時間は図7に示すような計算モデルで表現可能であることが確認された。

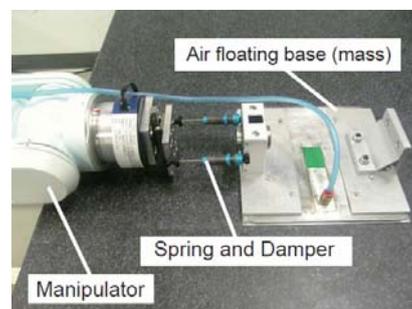


図6 手先インピーダンス機構

これらのモデルを考慮して、制御むだ時間が接触力に及ぼす影響について検討を行ったところ、接触力波形は、むだ時間の大小、及びインピーダンスの大小によって、図8、9のように変化し、以下の関係が明らかになった。

- むだ時間の期間においては、アーム固有の機械インピーダンス特性が表れる。
- むだ時間の増加に伴う接触力波形の変化は、インピーダンス増加に伴う波形の変化に近似している。
- 接触時間がむだ時間に比べて十分に長い場合は、インピーダンスを引き下げることにより接触維持が可能となる。(図8, 9の場合, 60[ms]の差でマッチングインピーダンス約1/10となる)

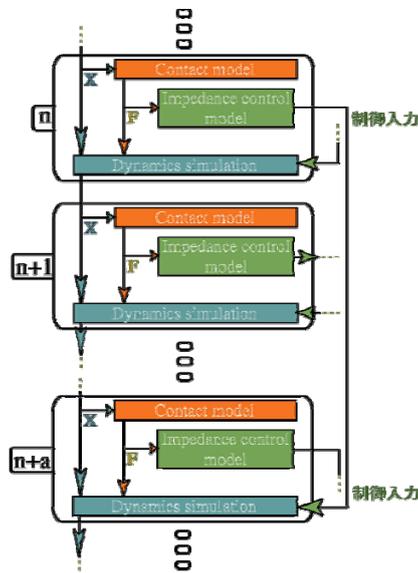


図7 動力学シミュレーションにおける制御むだ時間モデル

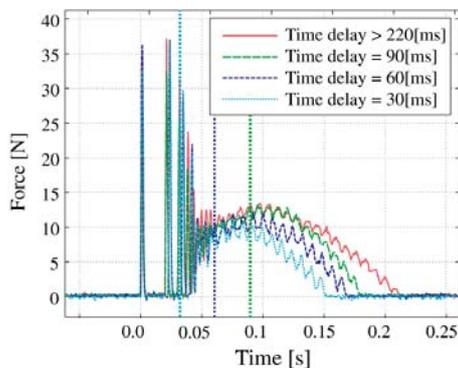


図8 制御むだ時間による接触力波形の変化 (インピーダンス一定)

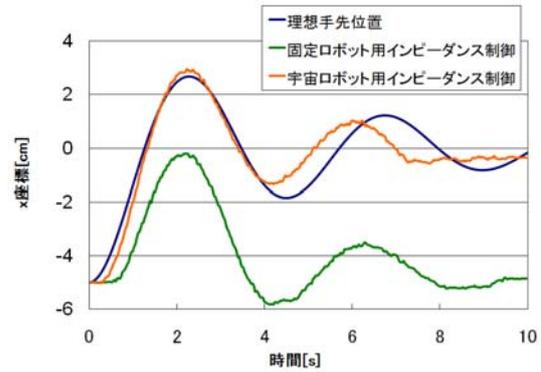


図9 インピーダンスによる接触力波形の変化 (制御むだ時間一定)

(3) フリーフライング宇宙ロボットにおける手先インピーダンス制御の実現とターゲット把持システムの検討

①「宇宙ロボットのための手先インピーダンス制御法の検証

図3の空気浮上ロボットモデル用いて、宇宙ロボットの為の手先インピーダンス制御法の実証を行った。本制御法は、従来の手先インピーダンス制御と異なり、ベースの運動に影響を受けることなく慣性空間に対する手先インピーダンスを実現するものである。図10に従来の固定ロボット用の制御法と提案する宇宙ロボット用制御法をそれぞれ空気浮上ロボットに適用した際の手先のインパルス応答例を示す。従来の手法では、手先の振動中心が-X方向にずれてしまったのに対し、本提案手法では、理想曲線に近い運動を示し、制御の有効性が確認された。

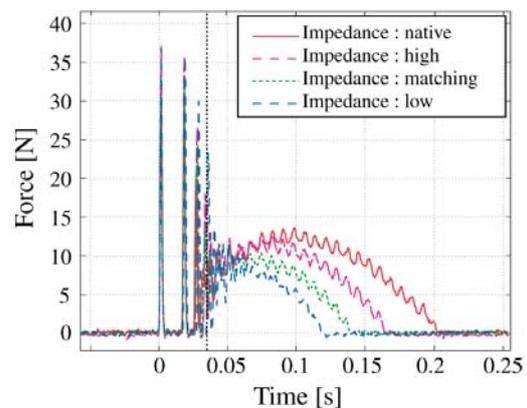


図10 空気浮上ロボットモデルによる手先インピーダンス制御のインパルス応答

② 手先インピーダンス制御を用いた衛星捕獲法の検討

本制御法を用いて空気浮上ターゲットモデルとの接触維持実証を行い、適切なインピーダンス特性を与えることにより接触が維持できることを確認した。また、接触維持をしている間に自動的にターゲットを把持する制御手法について検討を行った。ターゲットがタンプリングしている場合などは、突き飛ばしを防ぐことは可能でも、あまり長い間接触を維持し続けることは困難である。この場合初期接触後できるだけ速やかに把持を完了する必要がある。本研究では、新たにセンサを追加する必要がない接触力をトリガーとして把持を行う以下の手法を提案し、検証を行った。ハンドの内部にターゲットの把持可能部が接触すると、インピーダンス制御によりそのまま接触が維持され、同時にインピーダンス制御用の力センサが検知した力データをトリガーとしてハンドが自動的に閉じ、把持を完了する。実証実験の結果は良好であり、本手法の有効性が確認された。図 11 に実験の様子を示す。

(4)コンタクトダイナミクスに基づく適応的なインピーダンス・マッチング制御法の開発

ターゲットの慣性パラメータ、接触特性から、接触を維持する適切な機械インピーダンスパラメータが決定される。しかし、ターゲットのパラメータが未知の際に、接触を維持する適切な機械インピーダンスパラメータを決めることができない。この最適インピーダンスパラメータよりも大きな手先インピーダンスを与えてしまった場合、初期接触後直ちにターゲットを突き飛ばしてしまう。また、手先インピーダンスが小さい場合は、ターゲットを突き飛ばすことはないが、アーム側が弾かれるため、複数回接触を繰り返した後で接触が維持されるようになるため、非効率である。また、制御的にも不安定となり、続けて行われるターゲットの把持などの動作に悪影響を及ぼす可能性がある。本研究では、手先に新たに簡易な一軸距離センサを搭載し、これを用いてターゲットのパラメータを以下の手順でオンラインで推定し、自動的に最適インピーダンスパラメータを決定する手法について検討した。

1. 接触前に出来るだけ小さい手先インピーダンス特性を与え、ターゲットに接触させる。
2. 手先が弾かれるとともに、ターゲットの運動も接触力により僅かに変化する。

3. ターゲットの運動変化を距離センサーで計測し、接触力のデータとあわせ運動量保存の原理よりターゲットの慣性を推定する。
4. 推定したターゲットの慣性データをもとに、最適インピーダンスパラメータを決定し、制御パラメータを更新する。
5. 2 回目の接触で接触が維持される。

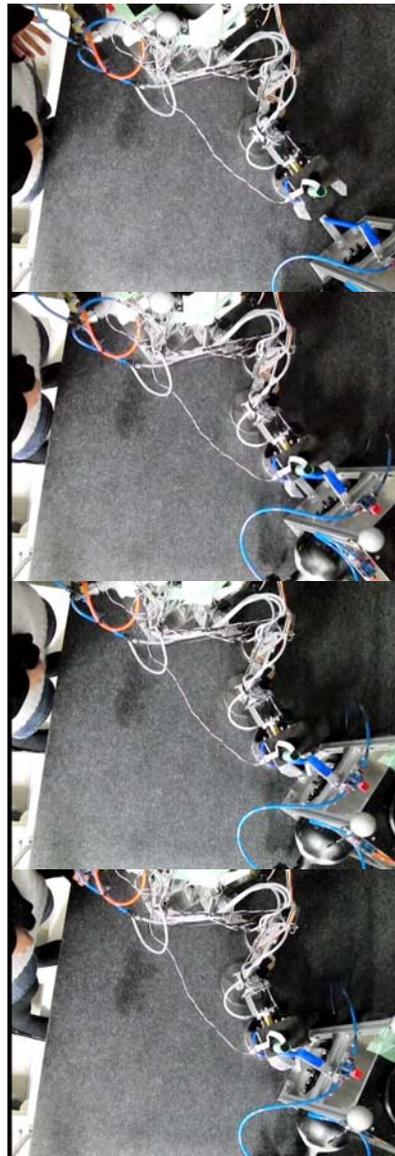


図 11 空気浮上ロボットモデルによるターゲットの捕獲

実証実験の結果、慣性推定誤差は最大 10%程度であり、リアルタイムでパラメータ更新、適切な接触維持が可能であることが確認された。

図 12 に実証実験の結果例を示す。接触 1 回目で手先が弾かれることにより若干相対位

置が開くが次回接触までの間に慣性推定及び、インピーダンスパラメータの更新を完了し、2回目の接触では、適切に接触が維持されている。

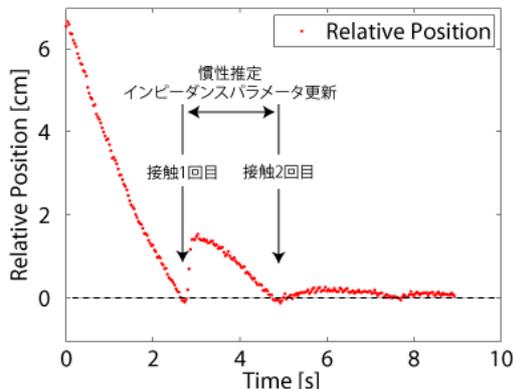


図 12 ロボット手先・ターゲット接触時の相対位置履歴

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

(1) Hiroki Nakanishi, Naohiro Uyama, Kazuya Yoshida, Virtual Mass of Impedance System for Free-Flying Target Capture, Proc. of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 査読有, 2010, 4101-4106

(2) 中西洋喜, 佐藤隼人, 吉田和哉, 澤田弘崇, 小田光茂, ハイブリッドシミュレータを用いた浮遊ターゲット捕獲の接触力学解析, 日本機械学会論文集(C編), 査読有, 76 巻, 2010, 128-133

(3) Tomohisa Oki, Hiroki Nakanishi and Kazuya Yoshida, Time-Optimal Manipulator Control for Management of Angular Momentum Distribution during the Capture of a Tumbling Target, Advanced Robotics, 査読有, Vol. 24, 2010, 441-466

(4) Hiroki Nakanishi, Masaaki Kodama and Kazuya Yoshida, Influence of Control Time Delay on the Dynamics of Satellite Capture, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, SPACE TECHNOLOGY JAPAN, 査読有, Vol. 7, 2009, Pf29-Pf34

(5) Tomohisa Oki, Hiroki Nakanishi and Kazuya Yoshida, Time-Optimal Manipulator Control of a Free-Floating Space Robot with Constraint on Reaction Torque, Proc. of 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 査読有, 2008, 2828-2833

[学会発表] (計 5 件)

(1) Naohiro Uyama, Kazuya Yoshida, Hiroki Nakanishi, Mitsushige Oda, Hiroataka Sawada, Satoshi Suzuki, Contact Dynamics Modeling for Snare Wire Type of End Effector in Capture Operation, 28th ISTS, 平成 23 年 6 月 8 日, 沖縄

(2) 前田敏博, 中西洋喜, 大木智久, 吉田和哉, フリーフライング宇宙ロボットにおける慣性特性を考慮した最適運動量分配制御, 第 15 回ロボティクスシンポジウム, 平成 22 年 3 月 15 日, 奈良

(3) 浅木森 孔貴, 池田 裕樹, 平野 大地, 池田 紗和子, 前田 敏博, Christina Tomiye McQuirk, 中西洋喜, 吉田 和哉, 微小重力環境下のロボットを模擬する空気浮上型テストベッドの設計と製作, 計測自動制御学会東北支部 45 周年記念講演会, 平成 21 年 9 月 8 日, 岩手

(4) 鶴山尚大, 中西洋喜, 吉田和哉, 澤田弘崇, 小田光茂, 鈴木悟, 宇宙ステーション搭載アームを用いた捕獲ミッションにおける LEE (Latching End Effector) とターゲットの接触力学解析, 第 18 回アストロダイナミクスシンポジウム, 平成 20 年 7 月 28 日, 相模原

(5) 中西洋喜, 児玉正明, 吉田和哉, むだ時間要素を含む手先インピーダンス制御を用いた衛星捕獲の接触力学解析, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008, 平成 20 年 6 月 7 日, 長野

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中西 洋喜 (NAKANISHI HIROKI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・研究開発本部・研究員

研究者番号: 90361120

(2) 研究分担者

なし ()

(3) 連携研究者

なし ()

(4) 研究協力者

安孫子 聡子 (ABIKO SATOKO)

ドイツ航空宇宙局 (DLR) 研究員 (~H20)

東北大学大学院 工学研究科 助教 (H21~)

Roberto Lampariello

ドイツ航空宇宙局 (DLR) 研究員