

機関番号：13701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560237

研究課題名（和文） 高度な作業を目指した多指ロボットハンド複数対象物把握系の安定性解析

研究課題名（英文） Static Stability Analysis of Multiple Objects Grasped by Multifingered Hands for Dexterous Manipulation

研究代表者

山田 貴孝 (YAMADA TAKAYOSHI)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：00273318

研究成果の概要（和文）：多指ロボットハンドによる高度な操りを目指して、複数対象物把握系の安定性を解析した。提案手法は、接触点に摩擦が有る場合には転がり接触の拘束条件を、無い場合には滑り接触の拘束条件を考慮して各指の剛性行列を導出している。このため、摩擦が有る接触点と無い接触点が混在する把持についても安定性を評価できる。把握系の剛性行列を解析的に導出しているため、把握パラメタが安定性に与える効果を陽に評価できる。

研究成果の概要（英文）：Aiming at dexterous manipulation by multi-fingered hands, we have analyzed static grasp stability of multiple objects. Our proposed method derives a stiffness matrix of every finger by considering frictional rolling contact constraints at contact point and frictionless sliding contact constraints. Hence, our method is able to evaluate coexistence grasps including both frictional contacts and frictionless contacts. Because grasp stiffness matrices have been derived analytically, the effect of grasp parameters to the stability is explicitly evaluated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：ロボットハンド，把持と操り

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：多指ロボットハンド，複数対象物，把持の安定性，剛性行列

1. 研究開始当初の背景

図1のように、人間は様々な形状の対象物を器用に把持し、操ることができる。このような能力をロボットで実現することが本研究課題の目的である。多関節型の多指ロボットハンドは研究・開発段階であり、実用化には至っていない。これは、

- ・多自由度であるために機構および協調制御が高度である、
- ・指先と対象物の間は接触に依存するために摩擦の有無や表面形状などの不確かさを伴う、

などが理由である。このため、把持と操りに関する研究の多くは対象物の数が一つに限定されていた。



図1 人間による対象物の器用な把持

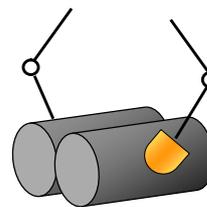


図2 多指ロボットハンドによる複数対象物の把持

マジックやジャグリングに代表されるように人間は多数の対象物を器用に把持し、操ることができる。人間の手に似せた多指ロボットハンドは高度な作業に対応する潜在能力を有するため、この能力を引き出す研究・開発が必要である(図2)。

複数対象物を把持する研究は、単にロボットハンドの高機能化のみならず、例えば次のような分野へ応用できる。

- ・加工対象物を固定する治具の効率的な配置を設計できる(図3)。
- ・生産ラインにおいて部品数が多い場合に複数対象物を把持することで作業時間を短縮できる。
- ・災害や事故処理など素早い作業が求められる場合に特に有効である。

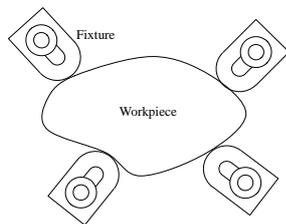


図3 治具による工作物の固定

2. 研究の目的

人間は様々な成功・失敗体験を通して、器用な把持手法を獲得し、対象物形状に応じて適切な安定把持を実現している。このような評価能力をロボットで実現することが求められている。そこで、研究代表者らはこれまでに、多指ロボットハンドの器用な把持と操りを目指して、複数対象物把握系の安定性を解析してきた。これらの成果をロボットにプログラムとして組み込み、安定把持を評価し、自律的に作業を実現することを目指している。

単一対象物を把持する場合、指先と把持対象物の接触点の形状や摩擦の有無が把握系の安定性に影響を与える。複数対象物を把持した場合には、さらに対象物同士の接触点の配置、表面形状、摩擦の有無を考慮して最適な安定把持を設計しなければならない(図4)。

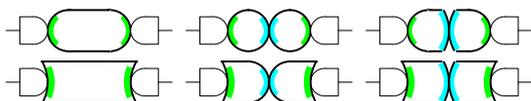


図4 単一対象物と複数対象物の違い

しかし、関連する従来の研究には、次のような解決すべき問題点がある。

- ・多くの研究は、接触点が摩擦により転がる場合に限定されている。
- ・摩擦が無く滑る場合でも、次元ばねで滑り接触を表現するなどの不適切な拘束条件

を用いている。

- ・三次元対象物の表面形状が単純なものに限定されており、曲率、振率、計量テンソルなどの曲面の幾何学が考慮されていない。
- ・回転関節の効果により指先姿勢が回転する場合は考慮されていない。

3. 研究の方法

図5のように、各指に生じる変位と反力の関係をばねモデルで設定し、把握系をばね系に置き換える。外乱により把持対象物に位置・姿勢変位が生じ、仮想ばねが変形すると、把握系にポテンシャルエネルギーが蓄積される。このエネルギーが初期把持状態で局所最小であれば、任意の外乱に対して把握系は安定である。安定性は、このエネルギーの二階偏微分であるヘッセ行列の正定性により評価できる。この行列の固有ベクトルにより把握系の変位方向を表わす変位モードを、固有値によりそのモードの安定性が得られる。把握系をばね系で置き換えているため、この行列を剛性行列と呼ぶ。

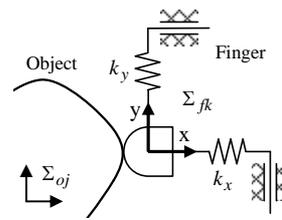


図5 直交ばねモデル

対象物の変位に応じて指は対象物上を移動する。接触点に摩擦が有る場合には指先は対象物上を転がる。摩擦が無い場合には指先は対象物上を滑る。このため、転がり接触と滑り接触の拘束条件をそれぞれ考慮して、各指の剛性行列を解析的に導出する。なお、氷や石鹸のように滑りやすい対象物を把持する場合には、接触点に摩擦が無いと仮定して最適な安定把持を設計する必要がある。また、画像等で把持対象物の形状は獲得されているが摩擦の有無が未知の場合には、摩擦が生じないと仮定して滑り接触のもとで最適な安定把持を設計することになる。このように、滑り接触の解析は非常に重要である。

複数対象物の場合、対象物同士の滑りと転がりを表わすパラメータを導入する必要がある。このため、剛性行列の次元は大きくなり、解析は複雑になる。また、姿勢を表わす回転行列に三角関数が含まれるため非線形の問題となり、さらに解析は複雑になる。これらの問題点を解決し、把握系の剛性行列を詳細かつ解析的に導出する。

提案手法は剛性行列を解析的に導出するため、把握パラメータ(接触点位置、向き、曲率、指先力、摩擦の有無)が安定性に与える効果を陽に評価できる。

4. 研究成果

本研究課題では、高度な操りを目指して多指ロボットハンドによる複数対象物把握系の安定性を解析した。そして、次の成果を得た。

(1) 二次元平面内で把持する場合について、指を二次元直交仮想ばねでモデル化した。そして、二つの対象物を把持する場合について考察した。二対象物の場合、対象物間の形状と摩擦の効果を考慮する必要がある。接触点に摩擦が有る場合には転がり接触の拘束条件を、無い場合には滑り接触の拘束条件を考慮して各指の剛性行列を解析的に導出した。さらに、摩擦の有無が混在する把握系の剛性行列を明らかにした。数値例では、全ての接触点で転がる場合、全ての接触点で滑る場合、指先が滑り対象物同士が転がる場合、指先が転がり対象物同士が滑る場合などの様々な場合について調べ、接触点の摩擦の効果、表面形状の効果などを明らかにした。得られた結果は人間の直感と一致し、提案手法の有効性が示された。(雑誌論文③)

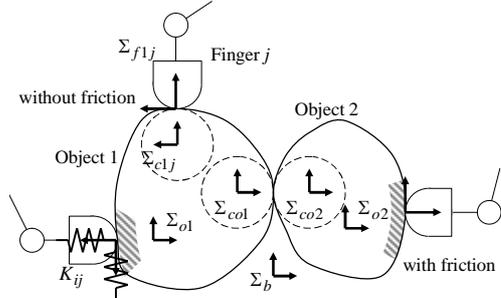


図6 二次元平面内の二対象物把持

(2) 二次元平面内の把持に関して従来とは異なり、図7のように放射状に配置された三個以上の対象物を把持する場合を考察した。接触点の摩擦の有無が混在する場合を考慮し、把握系の剛性行列を解析的に導出した。数値例では、図8のように三つの対象物を直列に把持した場合を例示し、接触点に摩擦が有る場合には5行5列の剛性行列が得られることを示した。この行列の固有ベクトルにより変位モードが図5のように得られ、固有値によりそのモードの安定性が評価できる。図9(a)は外乱により水平方向に並進変位する場合であり、指による反力が生じるため、安定である。(b)は真ん中の対象物が押し出され、不安定である。(c)は両端の対象物の変位により指に反力が生じ、安定である。(d)は中心の対象物の回転変位を助長する力が発生し、不安定である。(e)は回転変位を戻す反力が生じ安定である。実際の把持では任意の外乱が生じるため、モード2と4により把握系は不安定になる。様々な場面で人間はこの不安定なモードを経験することにより、この把持が不安定であることを直感的に推

測していると思われる。このように、人間の直感に一致し、提案手法の有効性が示された。(雑誌論文②, 学会発表⑧⑨⑩)

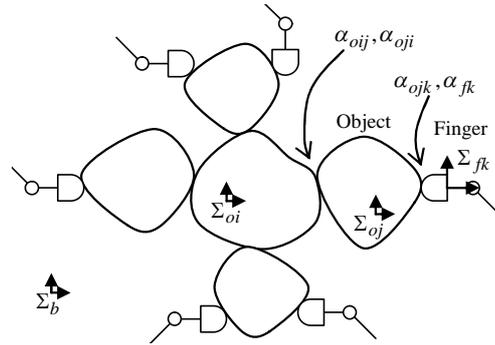


図7 二次元平面内の複数対象物把持

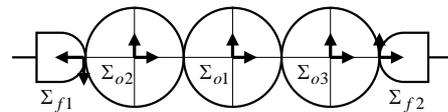


図8 三対象物直列把持の例

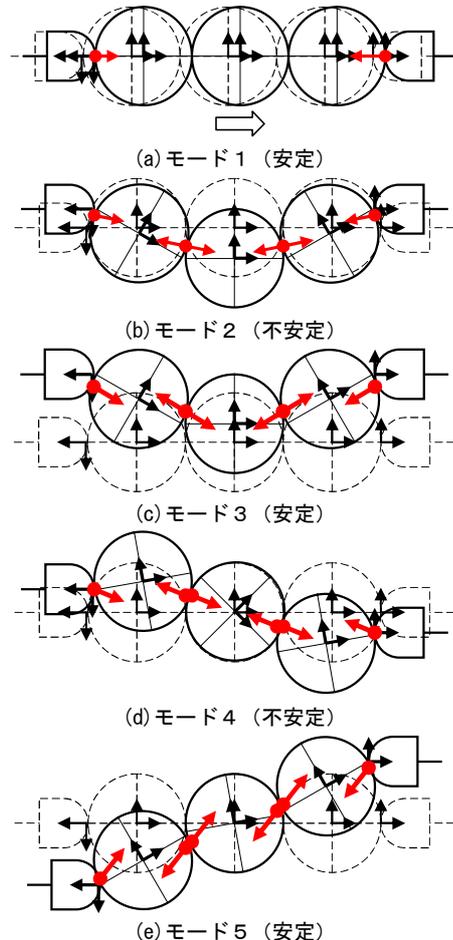


図9 摩擦の有る直列把持の変位モード

(3) 図10のように、三対象物が相互干渉する把持を考察し、全ての接触点で滑る場合には6行6列の剛性行列を、転がる場合には

3行3列の剛性行列を導出した。(学会発表④)

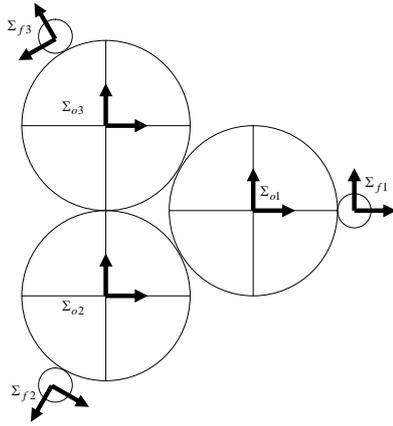


図10 三対象物が相互に干渉する把持

(4) 動力学シミュレータ (Open Dynamics Engine) を用いて図8の三対象物把持の変位モードを可視化した。この把握系は零以下の固有値を含み不安定な把持であるため、対象物、指それぞれを独立して構成すると安定なモードが表示されない。したがって図11に示すリンク系を構成した。変位モードに応じて生じる指先位置変位を転がり接触、滑り接触を考慮して実現した。図12は摩擦無し滑り接触の場合の可視化結果である。安定なモードを青色、不安定なモードを赤色で表示した。指先から出ている線は指先力であり、滑り接触のため対象物に対し法線方向を向く。七つの変位モードが得られ、次のことが分かる。(a)はx方向への並進変位であり安定である。(c),(d),(f)は対象物の変位方向と指先力の方向を見れば明らかに不安定である。(b),(e),(g)は対象物だけが変位し、指は変位しないためポテンシャルエネルギーは変化せず、初期状態に戻す力が発生しないため不安定である。以上のように、固有ベクトルが示す複数の変位モードを可視化するためのプログラムを作成した。これにより、対象物と指の動きが明確になり、安定か否かの識別が直感的に判断し易くなった。(学会発表③)

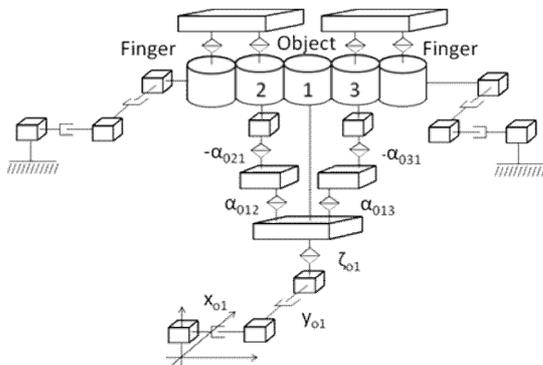


図11 モデルの構造

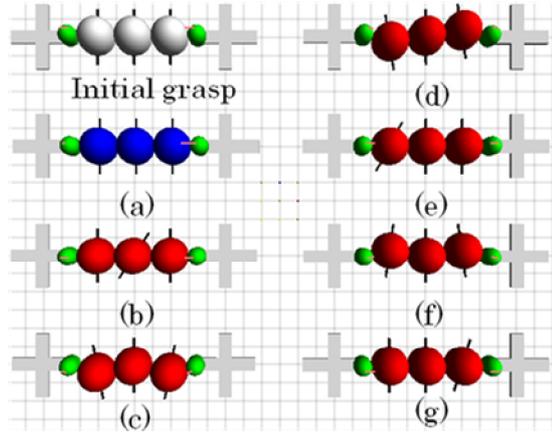


図12 ODEによる変位モードの可視化

(5) 三次元空間内で二対象物を把持する場合について三次元直交仮想ばねモデルを用いて考察した。接触点近傍の形状を二方向の主曲率を用いて楕円体で近似し、把握系の運動学的解析を簡明に行った。接触点の摩擦の有無が混在する場合を扱った。そして、把握系の剛性行列を導出した。この行列は、対象物同士の接触点に摩擦が無い場合には11行11列、摩擦がある場合には8行8列になる。固有値と固有ベクトルにより安定性とその方向を導出した。数値例により本手法の有効性を確認した。(学会発表⑤⑬⑭)

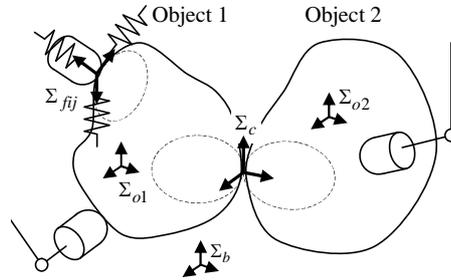


図13 三次元空間内での二対象物把持

(6) 三次元空間内で単一対象物を把持する場合を解析した。従来とは異なり、接触点近傍の形状を表面の幾何学、すなわち計量テンソル、曲率、振率を用いて解析した。これにより、より一般的な対象物形状を扱うことができるようになった。さらに、接触点の摩擦の有無が混在する、より一般的な場合をも解析し、把握系の剛性行列を解析的に導出した。数値例を用いて、剛性行列の固有値と固有ベクトルを求め、把握系の安定性とその方向を明らかにした。得られた結果は直感と一致し、本手法の有効性が確認された。(雑誌論文①, 学会発表⑦⑩⑫)

(7) 三次元空間内で二対象物を把持した場

合について、曲面の幾何学を考慮して解析した。これにより、二対象物の形状に対する制限が緩和され、より複雑な形状の対象物を扱えるようになった。重力が把持の安定性に与える効果も解析した。(学会発表②)

(8) 人間の手に似た多関節型ハンドの場合、回転関節を有する。このため、指先が回転することによる安定性への効果を明らかにする必要がある。そこで、図 14 のように指リンクを考慮し、関節に回転仮想ばねを設定して解析した。回転関節の場合、拘束条件が非線形になるため複雑になるが、この問題点を解決し、把握系の剛性行列を解析的に導出した。数値例では図 15 に示す二本指把持を例示し、3行3列の剛性行列を計算し、固有ベクトルから三つの変位モードを得た。そして、次のことを明らかにした。従来の直交仮想ばねモデルとは異なり、回転仮想ばねモデルでは並進変位と回転変位に干渉が生じる。この特性を考慮して安定把持を設計しなければなら。(学会発表①⑥)

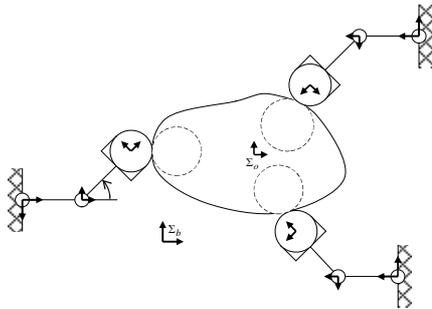


図 14 回転関節を考慮した把持

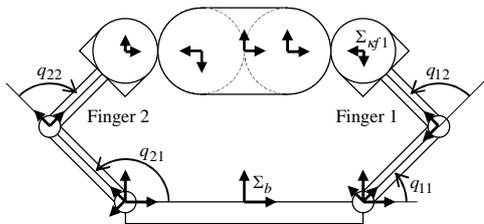


図 15 二本指把持の例

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 T. Yamada, T. Taki, M. Yamada, Y. Funahashi, H. Yamamoto, Static Stability Analysis of Spatial Grasps Including Contact Surface Geometry, Advanced Robotics, 査読有, Vol.25, No.3, 2011, pp.447-472
- ② T. Yamada, S. Yamanaka, M. Yamada, Y. Funahashi, H. Yamamoto, Static Stability Analysis of Grasping

Multiple Objects in 2D, International Journal of Information Acquisition, 査読有, Vol.7, No.2, 2010, pp.119-134

- ③ T. Yamada, N. Mimura, Y. Funahashi, Grasp stability analysis of two objects with any friction property in two dimensions, International Journal of Product Development, 査読有, Vol.10, Nos.1/2/3, 2010, pp.273-289

[学会発表] (計 20 件)

- ① 山田貴孝, 山中秀一, 山田学, 山本秀彦, 回転関節を有する二次元単一対象物把握系の安定性解析, 日本機械学会東海支部第 60 期総会講演会, 2011 年 3 月 15 日, 豊橋技術科学大学
- ② 滝俊也, 山田貴孝, 山田学, 山本秀彦, 曲面の幾何学を考慮した三次元二対象物把握系の安定性解析, 日本機械学会東海支部第 60 期総会講演会, 2011 年 3 月 15 日, 豊橋技術科学大学
- ③ 林和成, 山田貴孝, 山本秀彦, 二次元複数対象物把握系の安定性 (シミュレータを用いた把握系の変位モードの可視化), 日本機械学会東海学生会第 42 回学生員卒業研究発表講演会, 2011 年 3 月 13 日, 豊橋技術科学大学
- ④ 山田貴孝, 藤田春樹, 山本秀彦, 相互に干渉する二次元三対象物把握系の安定性解析, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2010), 2010 年 9 月 22 日, 名古屋工業大学
- ⑤ T. Yamada, Y. Funahashi, H. Yamamoto, Static Grasp Stability of Two Objects Approximated with Ellipsoidal Surface in Three Dimensions, The 13th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR2010), 査読有, 2010 年 9 月 1 日, 名古屋工業大学
- ⑥ 山田貴孝, 山本秀彦, 舟橋康行, 二次元平面内の摩擦有り単一対象物把握系の安定性解析 (多指ハンドの回転関節の効果を検討した場合), 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010 (ROBOMECH2010), 2010 年 6 月 16 日, 旭川大雪アリーナ
- ⑦ T. Yamada, T. Taki, M. Yamada, Y. Funahashi, H. Yamamoto, Stability Analysis of 3D Grasps by Considering Curvatures and Torsions of Contact Geometry, Fifteenth Int. Symp. on Artificial Life and Robotics 2010 (AROB 15th '10), 2010 年 2 月 6 日, 別府市 B-Con Plaza
- ⑧ T. Yamada, S. Yamada, M. Yamada, Y.

Funahashi, H. Yamamoto, Grasp Stability Analysis of Multiple Planar Objects, 2009 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO2009), 査読有, 2009年12月21日, Guilin, China

- ⑨ 山田貴孝, 山中秀一, 山田学, 舟橋康行, 山本秀彦, 二次元複数対象物把握系の安定性解析, 第27回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2009), 2009年9月17日, 横浜国立大学
- ⑩ 山田貴孝, 滝俊也, 山田学, 舟橋康行, 山本秀彦, 曲面の幾何学を考慮した三次元把握系の安定性解析, RSJ2009, 2009年9月17日, 横浜国立大学
- ⑪ 山中秀一, 山田貴孝, 山田学, 舟橋康行, 二次元複数対象物把握系の安定性解析, 日本機械学会東海学生会第40回学生員卒業研究発表講演会, 2009年3月16日, 岐阜大学
- ⑫ 滝俊也, 山田貴孝, 山田学, 舟橋康行, 曲率・振率を考慮した三次元把握系の安定性解析, 日本機械学会東海学生会第40回学生員卒業研究発表講演会, 2009年3月16日, 岐阜大学
- ⑬ 山田貴孝, 舟橋康行, 主曲率を考慮した三次元二対象物把握系の安定性解析, 第9回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2008), 2008年12月5日, 岐阜市長良川国際会議場
- ⑭ 山田貴孝, 金岡潤, 三村宣治, 舟橋康行, 三次元二対象物把握系の安定性解析 (楕円体による局所形状の近似), 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008 (ROBOMECH2008), 2008年6月6日, 長野市ビッグハット

〔図書〕 (計1件)

- ① T. Yamada, T. Mouri, N. Mimura, Y. Funahashi, H. Yamamoto, Identification of Contact Conditions by Active Force Sensing, Intelligent Systems for Knowledge Management, Studies in Computational Intelligence, 査読有, 2009, 部分執筆, pp.275-305, Ngoc Thanh Nguyen, Edward Szczerbicki, Springer

〔その他〕

ホームページ等

<http://www1.gifu-u.ac.jp/~yamata/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 貴孝 (YAMADA TAKAYOSHI)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号: 00273318

(2) 研究分担者

水野 直樹 (MIZUNO NAOKI)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号: 30135404

(H20→H21: 連携研究者)

山田 学 (YAMADA MANABU)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 40242903

(H20→H21: 連携研究者)

大羽達志 (OOBA TATSUSHI)

名古屋工業大学・工学研究科・助教

研究者番号: 90233254

(H20→H21: 連携研究者)