

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02116

研究課題名（和文）歯舌実測運動特性に基づく咀嚼ロボットシミュレーション

研究課題名（英文）Robotic Mastication Simulation Based on Measured Motion Characteristics of Teeth and Tongue

研究代表者

東森 充 (Higashimori, Mitsuru)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30346522

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：ヒトは咀嚼において、歯と舌の複雑な動作を組み合わせ、食品を粉砕し、唾液と混ぜ、ペースト状の食塊を形成していく。本研究では、ロボット咀嚼シミュレーションの新手法として、「ヒトの構造や動作の忠実な再現」を重視するのではなく、「形成されゆく食塊の忠実な再現」を目指す「食塊形成マニピュレーション」のコンセプトを提案した。これは、ヒトの咀嚼に基づいた食塊形成プリミティブを定義し、これらを実行可能なロボットを設計・開発することで、ヒトの食塊形成をその過程を含めて再現する、というコンセプトである。設計・開発したロボットによる食塊形成実験を行い、ヒトの食塊形成を再現できる可能性を示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、ヒトの咀嚼の工学的理解と再現に向けて、食塊形成マニピュレーション技能を具現化するためのロボットモデル（機構・制御系、計測系、情報処理系）構築といった学術的意義を有する。また、本研究で提案した咀嚼ロボットは、超高齢社会において、ヒトの摂食メカニズムの解明、咀嚼困難者の病態評価、および、介護用食品の開発支援に貢献できる可能性を有している。

研究成果の概要（英文）：Humans combine complex motions of the teeth and tongue during mastication to crush food, mix it with saliva, and form a swallowable food bolus. The fields of food science and industry desire to reproduce such a food bolus formation by robots to evaluate food quantitatively. This study proposed a novel robotic mastication simulator dedicated to the faithful reproduction of food bolus formation. First, three primitives involved in food bolus formation were defined: crushing, mixing, and gathering. Subsequently, the structure and motions of the robot were designed to execute these primitives, and the robotic mastication simulator was developed. Sequentially performing the primitives, the robot attempted to reproduce the human food bolus formation. Finally, human and the proposed robot masticated test foods, and the resulting food bolus images were analyzed using a convolutional neural network. It was shown that the proposed robot has a potential to reproduce human food bolus formation.

研究分野：ロボティクス

キーワード：咀嚼ロボット 柔軟物マニピュレーション ソフトロボティクス 食塊形成

1. 研究開始当初の背景

ヒトは咀嚼において、歯や舌、頬の複雑な動作を組み合わせ、食品を粉碎し、唾液と混ぜ、ペースト状の食塊を徐々に形成していく。興味深いことに、ヒトは上記のような複雑な食塊形成技能を、幼少期からの訓練により獲得し（一部、先天的に有し）、日常的にはほぼ無意識に遂行している。これに対し、食品科学／産業分野において、食感、味、香りなどの客観的・定量的評価のために、機器によるヒトの食塊形成過程の再現が切望されている。しかしながら、従来の模擬的な咀嚼に関する機器やロボットは、食品の単純な圧縮・破断試験に留まるものが一般的であり、ヒトのような食塊形成までをも実現したものは見当たらない。その大きな要因は、ヒトの口腔内構造や咀嚼動作をロボットで再現することの難しさにあると言える。

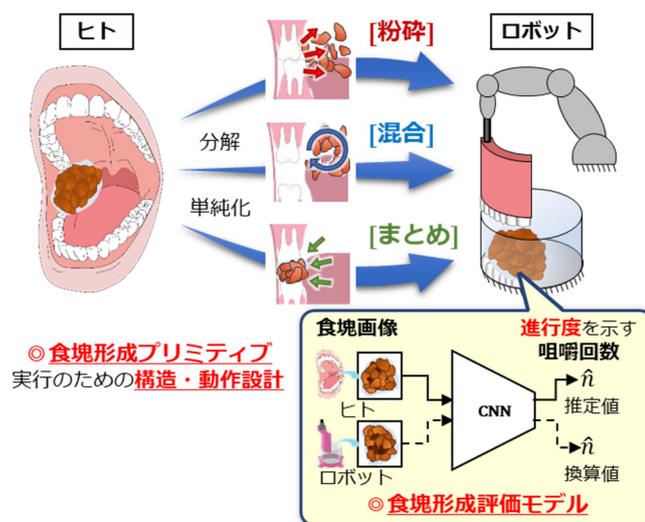


図1. 食塊形成マニピュレーション

2. 研究の目的

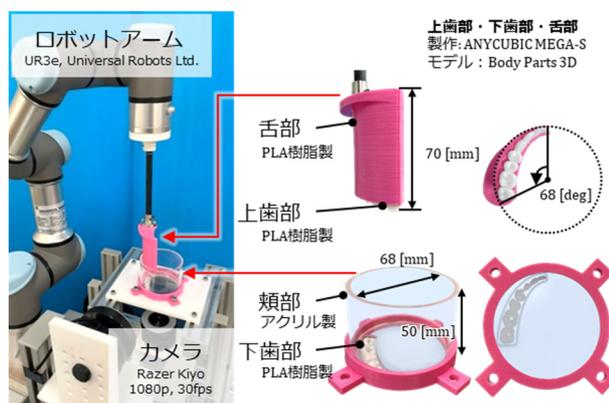
以上の背景のもと、本研究では、食品評価に向けたロボット咀嚼シミュレーションの新展開として、「ヒトの構造や動作の忠実な再現」を重視するのではなく、「形成されゆく食塊の忠実な再現」を目指す「食塊形成マニピュレーション」のコンセプトを提案する。これは、ヒトの咀嚼に基づいた食塊形成プリミティブを定義し、これらを実行可能なロボットを設計・開発することで、ヒトの食塊形成をその過程を含めて再現する、というコンセプトである。ロボット咀嚼シミュレータを設計・開発し、食塊形成実験によってその有効性を示す。

3. 研究の方法

①食塊形成プリミティブとその実装

図1は、研究代表者らが提案した食塊形成マニピュレーション手法の概念図である。本手法では、ヒトの咀嚼に関する構造と動作を分解・単純化することで、ロボットによる食塊形成のためのプリミティブを3つ定義している。1つ目は、歯を用いて食品やその断片群を粉碎する、[粉碎] プリミティブである。2つ目は、舌を用いて断片群と唾液を混ぜ合わせる、[混合] プリミティブである。3つ目は、舌や頬を用いて断片群を歯の上へまとめる、[まとめ] プリミティブである。

図2(a)に、食塊形成プリミティブを実行するためのロボットの構造設計について示す。ロボットは6自由度アームのエンドエフェクタである上歯部と舌部、土台に固定された下歯部と頬部から構成される。上下の歯の形状は、ヒトの歯の3D-CADデータに基づいて設計している。ヒトの咀嚼は、ほとんどの場合、歯の左右いずれか片側の列のみを用いて行われることから、ロボットの上歯部、下歯部ともに、右側列のみを実装している。なお、透明な頬部や下歯部ベースを通して、側面および底面から食塊形成過程の様子をカメラで撮影することができる。図2(b)に、食塊形成プリミティブを実行するためのロボットの動作設計について



(a) 構造設計

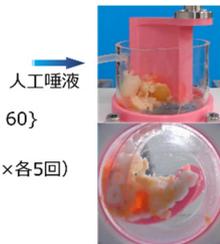


(b) 動作設計

図2. 食塊形成プリミティブの実装

示す。[粉碎]では、上歯部を下降させ、下歯部に接触させた後、水平方向に往復させることで、食品を粉碎する。[混合]では、舌部を回転させることで、断片群および唾液を混合する。[まとめ]では、舌部を頬部に向けて移動させることで、断片群を挟み、下歯部の上にとどめる。このような3つのプリミティブを逐次実行するものとし、その際の配列を、プリミティブシーケンスと呼ぶ。

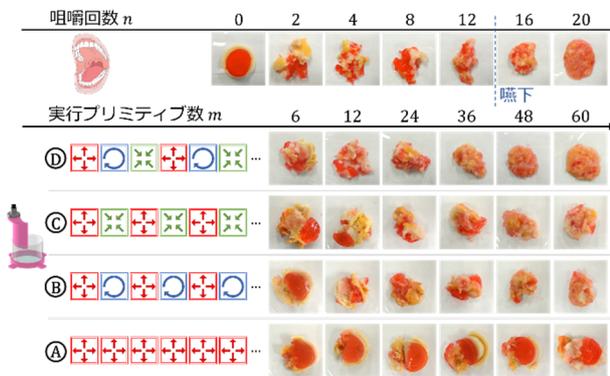
- シーケンス: {A, B, C, D}
- 実行プリミティブ数 m : {6, 12, 24, 36, 48, 60}
- 実験回数: 120回
(シーケンス4通り×実行プリミティブ数6通り×各5回)
- 人工唾液 (水) : 0.03 [ml/プリミティブ]



(a) ロボットの実験条件

②食塊形成評価モデル

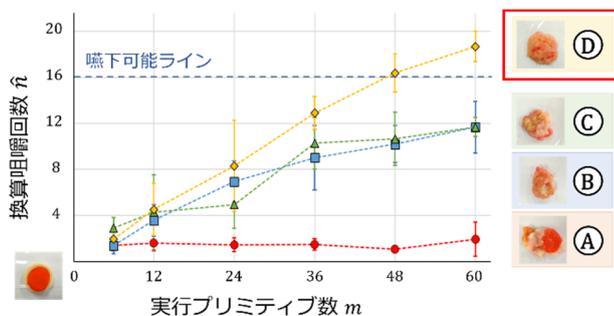
プリミティブを逐次実行する際、その過程で形成されていく食塊の状態を定量的に評価したい。そのために、図1の吹き出しに示すような、食塊形成評価モデルを作成している。これは、食塊画像から咀嚼回数（その食塊が、何回の咀嚼動作（下顎の往復動作）によるものか）を推定するCNN（Convolutional Neural Network）モデルであり、ヒトの咀嚼による食塊画像とその咀嚼回数を教師データとして学習されている。ロボットが形成した食塊画像を学習済みモデルに入力することで、その食塊の進行度合いを示す、換算咀嚼回数が出力される。ロボットの実行プリミティブ数の増加に伴って、換算咀嚼回数が適切に増加した場合、ヒトの食塊形成過程を再現できたものとみなせる。



(b) 食塊画像

③食塊形成実験

図3に、食塊形成実験について示す。ヒトおよびロボットによって試験食品を咀嚼し、その過程の食塊画像を食塊形成評価モデルで評価することで、ロボットによる食塊形成の再現性を検証した。試験食品として、ゲル、マッシュポテト、最中を重ねたものを用いた。ロボットの食塊形成実験では、図3(a)に示すように、AからDの4つのプリミティブシーケンスを用いた。シーケンスAでは、[粉碎]のみを繰り返す。これは圧縮・破断のみを行う、一般的な模擬咀嚼機器の動作に相当する。シーケンスBでは、[粉碎]、[混合]を、シーケンスCでは、[粉碎]、[まとめ]を交互に繰り返す。シーケンスDでは、[粉碎]、[混合]、[まとめ]を順番で繰り返す。これら4つのシーケンスにおいて、実行プリミティブ数6~60の6通りについて各5回ずつ、合計120個の食塊形成実験を行った。なお、人工唾液として、1プリミティブあたりの換算で0.03[ml]の水を滴下した。図3(b)に、ヒト・被験者1名およびロボットによる食塊画像を示す。ヒトの食塊は咀嚼回数の増加に伴い、食品が細分化し、混ぜ合わさり、20回の咀嚼でペースト化されていることがわかる。なお、被験者は、咀嚼回数16を超えた食塊は嚥下可能な食塊であると申告した。一方、ロボットのシーケンスAでは、実行プリミティブ数が増加しても、食塊形成は進行していない。シーケンスB、Cでは、Aより細分化は進むが、ヒトと比べた際に、素材ごとの塊が大きく、ペースト度合いが低く見える。シーケンスDでは、ヒトの食塊形成過程と同様の傾向が見られ、徐々にペースト化していく様子が見えてくる。図3(c)に、各シーケンスにおけるロボット食塊画像の換算咀嚼回数を示す。横軸は実行プリミティブ数 m 、縦軸は換算咀嚼回数 \hat{n} を表す。シーケンスAでは、プリミティブ数 m に関わらず $\hat{n} = 2$ 程度となっており、食塊形成が進んでいない。シーケンスBおよびシーケンスCでは、 $m = 36$ から換算咀嚼回数の増加が弱まり、食塊形成の進行が不十分であるといえる。シーケンスDでは、実行プリミティブ数 m の増加に伴って換算咀嚼回数 \hat{n} が順調に増加している。実行プリミティブ数が $m > 48$ で嚥下可能ライン $n = 16$ を超えており、これはヒトの食塊形成過程を再現できていることを示唆している。このように、適切なシーケンスを設定することで、ヒトの食塊形成を、その過程を含めて再現できる可能性が確認できる。



(c) ロボットの食塊形成評価

図3. 食塊形成実験

4. 研究成果

ロボット咀嚼シミュレーションの新展開として、「形成されゆく食塊の忠実な再現」を目指す「食塊形成マニピュレーション」のコンセプトを提案し、実際に設計・開発したロボットを用いて食塊形成実験を実施した。ヒトの食塊形成をその過程を含めて再現できる可能性を示唆した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ichikura Hinano, Higashimori Mitsuru	4. 巻 7
2. 論文標題 In-Hand Manipulation Inspired by Diabolo Juggling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 12227 ~ 12234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2022.3215066	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Watanabe Yuyu, Higashimori Mitsuru	4. 巻 7
2. 論文標題 Synergy-Based Analytical Design of Wire-Driven Continuum Manipulators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 9310 ~ 9317
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2022.3191228	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 WATANABE Yuyu, HIGASHIMORI Mitsuru	4. 巻 87
2. 論文標題 Nonprehensile manipulation by using non-uniform friction distribution.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00388	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kurita Taisuke, Higashimori Mitsuru	4. 巻 39
2. 論文標題 Nonprehensile Manipulation Using an Underactuated Joint Mechanism with Nonparallelism and Viscoelasticity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 533 ~ 544
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.39.533	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 HASHIMOTO Daiki, SHIBATA Akihide, HASHIMOTO Kazuki, HORIGANE Tomoki, NAGAHATA Yuuya, HIGASHIMORI Mitsuru	4. 巻 90
2. 論文標題 Enclosure area expansion and reduction mechanism for artificial mastication device	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 23-00248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.23-00248	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mizuno Kaito, Higashimori Mitsuru	4. 巻 9
2. 論文標題 Internal Pressure Pattern Design for Variable Surface Shapes of Tongue-Type Pneumatic Soft Actuator	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 3491 ~ 3497
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2024.3368237	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 東森 充
2. 発表標題 咀嚼ロボットシミュレータを用いた食品のテクスチャー評価
3. 学会等名 日本顎口腔機能学会 第68回学術大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大石実優, 柴田暁秀, 東森 充
2. 発表標題 視覚運動統合学習に基づく対象物群の混和マニピュレーション動作の生成
3. 学会等名 第23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 (SI2022) 論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 市倉ひなの, 東森充
2. 発表標題 布状アタッチメントを用いた高適応In-Handマニピュレーション
3. 学会等名 第23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(SI2022)論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水野海渡, 兒玉匠平, 佐藤理加子, 大川純平, 堀一浩, 東森充
2. 発表標題 アレイ状配置チャンバを有する舌型空圧ソフトアクチュエータの設計
3. 学会等名 第23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(SI2022)論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水大夢, 石原清香, 池上聡, 中馬誠, 東森充
2. 発表標題 視触覚センサを用いた食感評価手法の開発
3. 学会等名 日本食品科学工学会第69回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木佑晟, 清水大夢, 柴田暁秀, 東森充
2. 発表標題 食塊形成マニピュレーション
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門ロボティクス・メカトロニクス講演会2022講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大石実優, 柴田暁秀, 東森充
2. 発表標題 視覚運動統合学習に基づく複数対象物群の混和マニピュレーション
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門ロボティクス・メカトロニクス講演会2022講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤瑛人, 柴田暁秀, 東森充
2. 発表標題 視触覚センサを用いた柔軟物体の変形・破断センシング
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水大夢, 池上聡, 石原清香, 中馬誠, 東森充
2. 発表標題 深層学習を用いた食塊画像認識に基づく咀嚼能力評価
3. 学会等名 日本食品科学工学会第68回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水大夢, 池上聡, 石原清香, 中馬誠, 東森充
2. 発表標題 3D-CNNを用いた動的食品テクスチャーの推定
3. 学会等名 日本食品工学会第22回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水野海渡, 平島光樹, 柴田暁秀, 兒玉匠平, 佐藤理加子 大川純平, 堀一浩, 東森充
2. 発表標題 実測舌特性に基づく咀嚼ロボットシミュレータ - 舌型空圧ソフトアクチュエータの試作 -
3. 学会等名 第22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(SI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柴田暁秀, 橋本大輝, 鈴木佑晟, 長畑雄也, 東森充
2. 発表標題 食塊包囲・圧縮機構を備えた咀嚼ロボットシミュレータ
3. 学会等名 第22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(SI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村端佑真, 柴田暁秀, 大石実優, 東森充
2. 発表標題 視覚運動統合学習に基づく対象物群のマニピュレーション
3. 学会等名 第22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(SI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋本大輝, 高橋龍馬, 柴田暁秀, 長畑雄也 橋本昌晴, 清水里奈, 堀田真理子, 井上賀美, 東森充
2. 発表標題 柔軟包囲機構を用いた食塊形成マニピュレーション
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平島光樹, 高橋龍馬, 柴田暁秀, 長畑雄也, 橋本昌晴, 清水里奈, 堀田真理子, 井上賀美, 東森充
2. 発表標題 深層学習を用いた歯・舌両有型咀嚼ロボットによる食感評価
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会予稿集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田暁秀, 長畑雄也, 井上賀美, 東森充
2. 発表標題 咀嚼マニピュレーションのための深層学習を用いた食塊形成評価
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会予稿集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 昌子晴海, 東森充
2. 発表標題 非引き連れ型柔軟メカニズムを用いた触覚センシング
3. 学会等名 第21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(SI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丸尾明廣, 柴田暁秀, 東森充
2. 発表標題 螺旋状柔軟体の振動軌道可変効果に基づく劣駆動型マニピュレータ
3. 学会等名 第21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(SI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 東森充
2. 発表標題 ロボットシミュレータを用いた食品のテクスチャー評価
3. 学会等名 第68回レオロジー討論会, 第22回レオロジー・フォーラム(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水孝紀, 鈴木佑晟, 柴田暁秀, 石原清香, 池上聡, 中馬誠, 東森充
2. 発表標題 突起状視触覚センサを用いた対象物表面特性の識別
3. 学会等名 第24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(SI2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 水野海渡, 東森充
2. 発表標題 アレイ状配置チャンバを有する空圧ソフトアクチュエータのための物体との相互作用を考慮した内圧パターン決定法
3. 学会等名 第41回日本ロボット学会学術講演会予稿集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 橋本和紀, 加藤優侑, 堀金智貴, 長畑雄也, 東森充
2. 発表標題 咀嚼ロボットシミュレータの食塊形成機能による新たな食品評価について
3. 学会等名 日本食品科学工学会第70回大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤優侑, 橋本和紀, 堀金智貴, 長畑雄也, 東森充
2. 発表標題 力覚と視覚のマルチモーダル深層学習を用いた食品評価に関する研究
3. 学会等名 日本食品科学工学会第70回大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高井優, 東森充
2. 発表標題 ユニット型分布遷移予測モデルに基づく密集物体群のマニピュレーション
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	堀 一浩 (Hori Kazuhiro) (70379080)	新潟大学・医歯学系・教授 (13101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------