

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K19488

研究課題名（和文）音信号教示によるシナジーの変容の分析とそのトレーニングへの応用

研究課題名（英文）Analysis of synergy transformation by sound signal teaching and the application to training

研究代表者

松本 賢太（Matsumoto, Kenta）

東京理科大学・工学部機械工学科・助教

研究者番号：50843364

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,300,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ヒトの運動制御に関わると考えられるリズムに着目し、音信号による運動教示システムを構築した。そして、運動教示がシナジーに与える影響を長期的に観察することで、運動教示とシナジーの関係性を明らかにした。また、熟練者の動きを教示する手法を考案し、シナジーにどのような変容を与えるか調査した。具体的には、足踏み運動のような単純なリズム動作において、「リズム感」の変化をすること、音信号による運動教示効果を確認した。また、野球投動作において、投動作のリズムを教示し、野球投動作のような協調的な動作における教示効果および投動作における巧みなシナジーの変容を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

子どもの運動能力の低下は、日常生活での怪我のリスクの増加だけでなく、運動することに苦手意識を覚え、スポーツなどの競技を通じて得られる「自身の運動能力を高める喜び」や「ヒトの和を形成する機会」の損失につながり、運動を通じて得られるクオリティ・オブ・ライフ（QOL）を考えれば、運動能力低下の問題を解決することは喫緊の課題といえる。本研究では、この問題の背景にある身体の制御に着目し、子どもの運動能力低下問題の解決のための有効なトレーニング手法を考案した。そして、従来の研究では示されていないシナジーの長期的な変容を示したという点に学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on rhythm, which is related to human motor control, and constructed a motor instruction system using sound signals. We then clarified the relationship between motor instruction and synergy by observing the effect of motor instruction on synergy over the long term. Moreover, we constructed a method to teach the movements of an expert, and investigated how it changes synergy. Specifically, we confirmed the effect of the motor instruction by observing changes in sense of rhythm in simple rhythmic movements such as stepping. We also clarified the effect of instruction in cooperative actions such as baseball pitching and the transformation of synergy in pitching movements.

研究分野：ロボティクス、機械力学、バイオメカニクス

キーワード：シナジー 運動教示 音信号 モーションキャプチャ

1. 研究開始当初の背景

文部科学省が実施する「体力・運動能力調査」の報告によると、昭和 58 年に比べ子どもの運動能力は低下している。特に、9、11 歳児の運動能力の低下が著しく、例としてソフトボール投げでは昭和 58 年に比べると、現在では 9 歳男子で約 5m、11 歳男子にいたっては約 7m 低下している(平成 29 年度体力・運動能力調査結果)。子どもの運動能力の低下は、日常生活での怪我のリスクの増加だけでなく、運動することに苦手意識を覚え、スポーツなどの競技を通じて得られる「自身の運動能力を高める喜び」や「ヒトの和を形成する機会」の損失につながり、運動を通じて得られるクオリティ・オブ・ライフ(QOL)を考えれば、運動能力低下の問題を解決することは喫緊の課題といえる。運動能力低下の背景に、肥満との相関について報告がある。肥満による質量増加が問題の一つかもしれないが、申請者はそれが直接的な要因でないと考え。なぜなら、子ども(12 歳男子を例)の体重だけでなく身長も昭和 58 年に比べ増加しており、筋骨格系として考えれば、昭和 58 年に比べ現代の子どもは発達している。それにも関わらず、ソフトボール投げの飛距離が低下していることから、子どもの運動能力低下問題の本質には、体格ではなく、身体の制御の問題が関わっている可能性がある。

身体制御の問題の根幹には、身体が冗長多自由度系であることに起因する不良設定問題がある。例えば、卓上のコップを取ろうとしたとき、関節角度の組み合わせやそれを動かす筋肉の組み合わせは無数に存在し、コップを取るという目標に対し、それを実現するための解候補が無数に存在してしまうといった問題である。この問題に対し Bernstein は、シナジーと呼ばれる協調的な動作を仮定し、ヒトの動作は少数のシナジーの組み合わせで表現できるという仮説を立てた。このシナジー仮説に基づいて、様々な研究が国内外で行われ、近年の研究では、少数のシナジーの組み合わせが歩行・走行という基本的な運動制御に関わることが明らかにされている。一方で、巧みなシナジーを獲得するには、どのようなトレーニングをすればよいのかは明らかにされていない。

2. 研究の目的

本研究では、ヒトの運動制御に関わると考えられるリズムに着目し、音信号によるシナジー獲得に有効な運動教示システムを構築する。そして、運動教示がシナジーに与える影響を長期的に観察することで、運動教示とシナジーの関係性を明らかにする。また、熟練者の動きを教示する手法を考案し、シナジーにどのような変容を与えるか調査する。具体的には、足踏み運動のような単純なリズム動作において、「リズム感」の変化を見ることで、音信号による運動教示効果があるのか調査した。また、下肢・上肢の巧みな協調が必要となる「野球投動作」において、投動作のリズム(以後、投球リズム)を教示するシステムを開発し、野球投動作のような協調的な動作における教示効果および投動作における巧みなシナジーの変容を明らかにした。

3. 研究の方法

(1) 実験 1 : 足踏み運動におけるリズム教示実験

実験概要

本研究では、ヒトのリズム感を「繰返し発生する外部刺激に追従する能力」として評価する。そこで、外部刺激としてパルス音を用い、繰返し鳴るパルス音に追従するように腳踏み動作を行い、その床反力と位置座標を計測した。そして、各波形の特徴から腳踏み動作のリズムを求め、腳踏み動作のリズムとパルス音のリズムを比較する事で、リズム感を評価した。加えて、実験回数を重ねることでリズム感がどのように変化するか調査した。

被験者

被験者は大学生 5 名とし、身長 170.6 ± 1.9 cm、体重 54.6 ± 2.6 kg、年齢 23.8 ± 0.8 歳であった。なお、東京理科大学が設置するヒトを対象とする医学系研究に係る倫理審査委員会の承認に基づき、被験者には同意を得た上で実験を実施した。

計測方法

腳踏み動作において、リズムを取る方法として、「着地のタイミングを音周期に合わせる」および「脚を上げるタイミングを音周期に合わせる」、2 つの方法が考えられる。そこで、着地のタイミングを床反力の波形から、脚を上げるタイミングを位置座標データから取得する。床反力はテック技販社製のフォースプレート TF-4060-D(以後、FP、サンプリング周波数 1000 Hz)により計測し、位置座標データは Acuity 社製のモーションキャプチャシステム Optitrack により計測した。

リズム感の評価方法

パルス音に合わせて腳踏み動作をするという特徴から、床反力、およびつま先の鉛直方向の位置座標(以後、つま先鉛直座標)の波形には、局所的最大値(以後、ピーク)が現れる。床反力の波形からピークを抽出した例を図 1 に示す。床反力の波形は、図 1(a)のように振動的な

波形となる。音周期が 0.20 sec の区間において、波形の一部を拡大して示したものを図 1(b)に示す。図 1(b)内の黒線は、パルス音が発生した時刻を示す。実験開始から k 回目になったパルス音の時刻を $T(k)$ とする。そして、 $(T(k-1) + T(k))/2$ から、 $(T(k) + T(k+1))/2$ の区間において、局所的な最大値となる変曲点をピークとした。このピークが発生する時刻（以後、ピーク時刻）の間隔から腳踏み動作の周期（以後、動作周期）を抽出する。具体的には、パルス音が発生する時刻 $T(k)$ に最も近いピーク時刻を $T_p(k)$ とし、 $T_p(k)$ 以前の時刻におけるピーク時刻を $T_p(k-1)$ とし、その差分 $\Delta T_p(k) = T_p(k) - T_p(k-1)$ を動作周期とする。そして、この動作周期を音周期 $\Delta T(k) = T(k) - T(k-1)$ と比較することでリズム感を評価した。以後、この指標を乖離度と呼称し、リズム感を評価していく。

$$DI = \frac{\sum |\Delta T_p(k) - \Delta T(k)|}{\sum \Delta T(k)} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

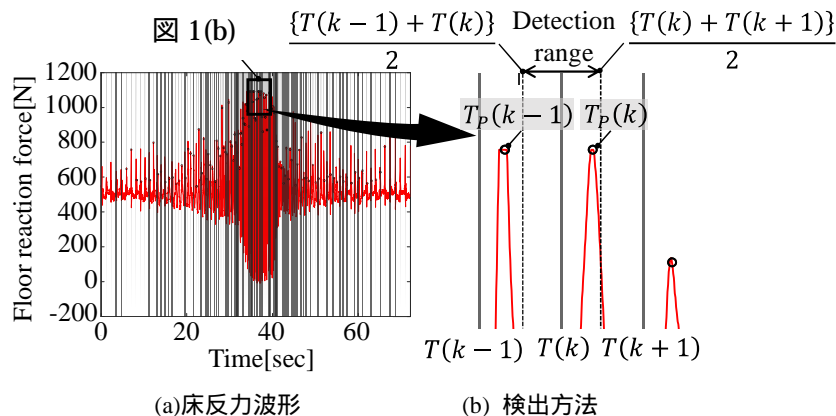


図 1 ピークの検出方法

(2) 実験 2：野球投動作におけるリズム教示実験

実験概要

本研究では野球投動作を対象に、「熟練者のリズム」を教示することで、巧みな身体の協調動作（シナジー）が獲得できると仮定し、音信号による教示装置を開発した。具体的には、熟練者の野球投動作を計測し、その動作に特異値分解を実施することで、運動パターンを抽出する。そして、野球投動作の中で最も寄与率の大きい（支配的な）運動パターンを可聴音に変化し、それを聞きながら動作を行うことで、運動を教示する。

この教示効果を確認するために、教示なし（条件 BE）、教示あり（条件 RT）、教示後（条件 AF）の 3 条件で実験をした。具体的には、BE では被験者に自然に投球し、RT では本システムによる教示を実施しながら投球した。また、AF では教示された投球リズムを再現するように投球した。実験は BE、RT、AF の順番で実施し、条件 BE で 10 球、条件 RT、AF で 5 球の投球を計測した。また、教示による経時的な変化を明らかにするために、この実験を週 2 回約 1 か月間の計 7 日間実施した。

被験者

被験者は非熟練者 4 名（A~D と呼称、身長 170.8 ± 6.0 cm、体重 73.0 ± 7.0 kg、年齢 25.0 ± 0.7 歳）とした。本研究において、非熟練者はクラブ・部活で競技経験の無い者とした。なお、東京理科大学が設置するヒトを対象とする医学系研究に係る倫理審査委員会の承認に基づき、被験者には同意を得た上で実験を実施した。

計測方法

本研究では、運動教示によるシナジー（協調動作）の変容を評価する。そこで、3 次元位置座標計測装置（Acuity 社製 Optitrack）を用いて、投動作およびボール挙動を計測した。

シナジーの抽出手法

音信号教示によるシナジーの変容を明らかにするために、特異値分解を用いてシナジーを抽出した。具体的には、セットポジションを時刻第 1 点、フォロースルーを時刻第 N 点とし、各被験者のセットポジションからフォロースルーにおける、身体マーカの位置座標データを並べた行列を $[R_a]$ ($R_a \in N \times 123$) とする。次に、各マーカのセットポジションにおけるマーカ位置座標データ列を \mathbf{x}_{MKH} ($\mathbf{x}_{MKH} \in 1 \times 123$) とし、 \mathbf{x}_{MKH} を行ごとに N 個並べた行列を $[R_0]$ ($R_0 \in N \times 123$) とする。このとき、 $[R_a]$ は以下のように展開でき、右辺第 2 項の $\sum_{k=1}^{123} \lambda_k \mathbf{v}_k \mathbf{z}_k^T$ がシナジーを示す。

$$[R_a] = [R_0] + \sum_{k=1}^{123} \lambda_k \mathbf{v}_k \mathbf{z}_k^T \quad (2)$$

4. 研究成果

(1) 実験1：足踏み運動におけるリズム教示実験

リズム感の日毎の変化

床反力およびつま先鉛直座標の波形から乖離度(式(1))を算出した。各被験者(A~Eと呼称)の乖離度について、日毎の変化を示した結果を、床反力の算出した乖離度について図2(a)に、つま先鉛直座標について図2(b)に示す。なお、各日の乖離度は5試行の平均値とした。図2(a)より、床反力の乖離度はどの被験者においても、日毎に減少する傾向にあることが分かる。すなわち、着地のタイミングでリズムを取り、その能力は向上する傾向にある。また、変化の傾向は被験者によって異なる。被験者A、Dは初日の乖離度が大きく、3日目には2%程度減少し、その後緩やかに減少する(図2(a)α)。一方で、被験者B、C、Eは初日から最終日にかけて緩やかに減少する傾向にある(図2(a)β)。これは、実験に慣れる期間は被験者によって異なるが、実験に慣れてからは同様の傾向で乖離度が減少したためと考えられる。次に、図2(b)より、つま先鉛直座標においても乖離度は日毎に減少する傾向にあることが分かる。また、被験者B、Cに関しては、床反力およびつま先鉛直座標のどちらでも乖離度が小さく、着地だけでなく、脚を上げる動作を含めた一連の動作をリズムカルに操ることで、リズムを取っていると考えられる。

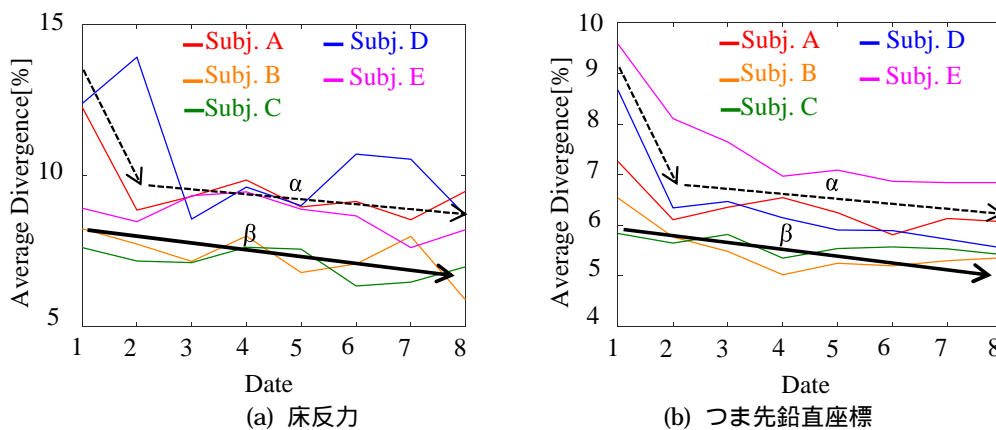


図28 日間におけるリズム感の変化

リズム感の初日と最終日の比較

図2に示した乖離度に関して、初日と最終日の値を比較した結果を、床反力について図3(a)に、つま先鉛直座標について図3(b)に示す。図3(a)より、被験者A、B、Dは乖離度が2%以上減少し、他の被験者に比べてリズム感が大幅に向上している。また、図3(b)より、被験者D、Eの乖離度が2%以上減少し、他の被験者に比べて大幅に向上している。このことより、着地のリズム感が向上する(A、B)、脚上げのリズム感が向上する(E)、両者が向上する(D)、両者ともに緩やかに向上する(C)の4パターンでリズム感が変化することが分かり、音信号による教示効果を確認することができた。

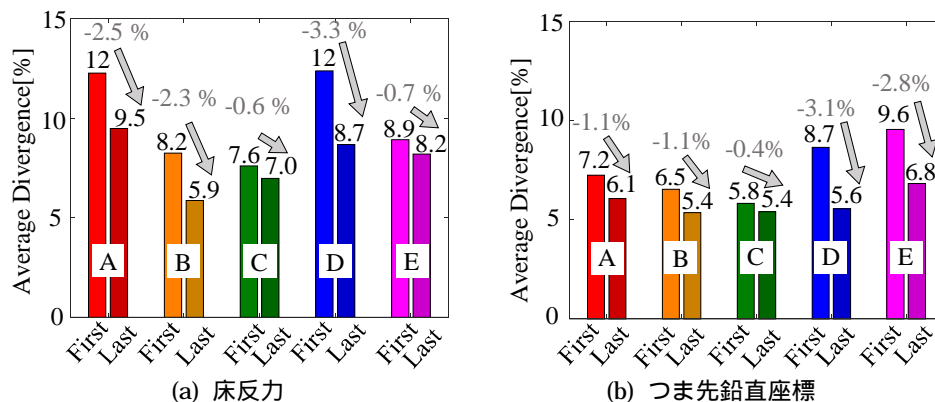


図37 初日と最終日におけるリズム感の比較

(2) 実験2：野球投動作におけるリズム教示実験

音信号教示によるシナジーの変容を明らかにするために、得られた挙動に特異値分解を実施し、主要な挙動を抽出する。式(3)より、最も支配的な挙動は以下のように求められる。

$$[R_1] = [R_0] + \lambda_1 v_1 z_1^T \quad (3)$$

運動教示によるシナジー変容を明らかにするために、教師データと条件 BE における非熟練者 A~D の 1、7 日目の各局面における挙動を比較した。その結果を図 4 に示す。特に、投動作における支配的な挙動は体軸の前後移動に見られることから、体軸に着目して分析していく。前額面における体軸の傾き（図 4(a)-(d)中下段(0)）を見ると、どの被験者も初日と最終日で変化が見られない。被験者 D に関しては、熟練者との乖離が見られるものの、初日と最終日において変化が見られず、前額面において教示による変化は表れていない。次に、矢状面における体軸の傾き（図 4(a)-(d)上段）を見ると被験者 A、B は体軸が Y 軸正方向に傾き（図 4(1)）、熟練者の挙動（青線）に近づいている。一方で、被験者 C、D は、体軸が Y 軸負方向に傾き（図 4(2)）、熟練者の挙動から離れている。したがって、本研究では、音信号によるシナジーの変容を確認することができたものの、熟練者の挙動に近づく被験者（A、B）と熟練者の挙動から離れる被験者（C、D）に分かれ、教示効果に差が見られた。今後は、被験者ごとにお手本とする熟練者を変えるなど、被験者に合った教示方法を検討していく。

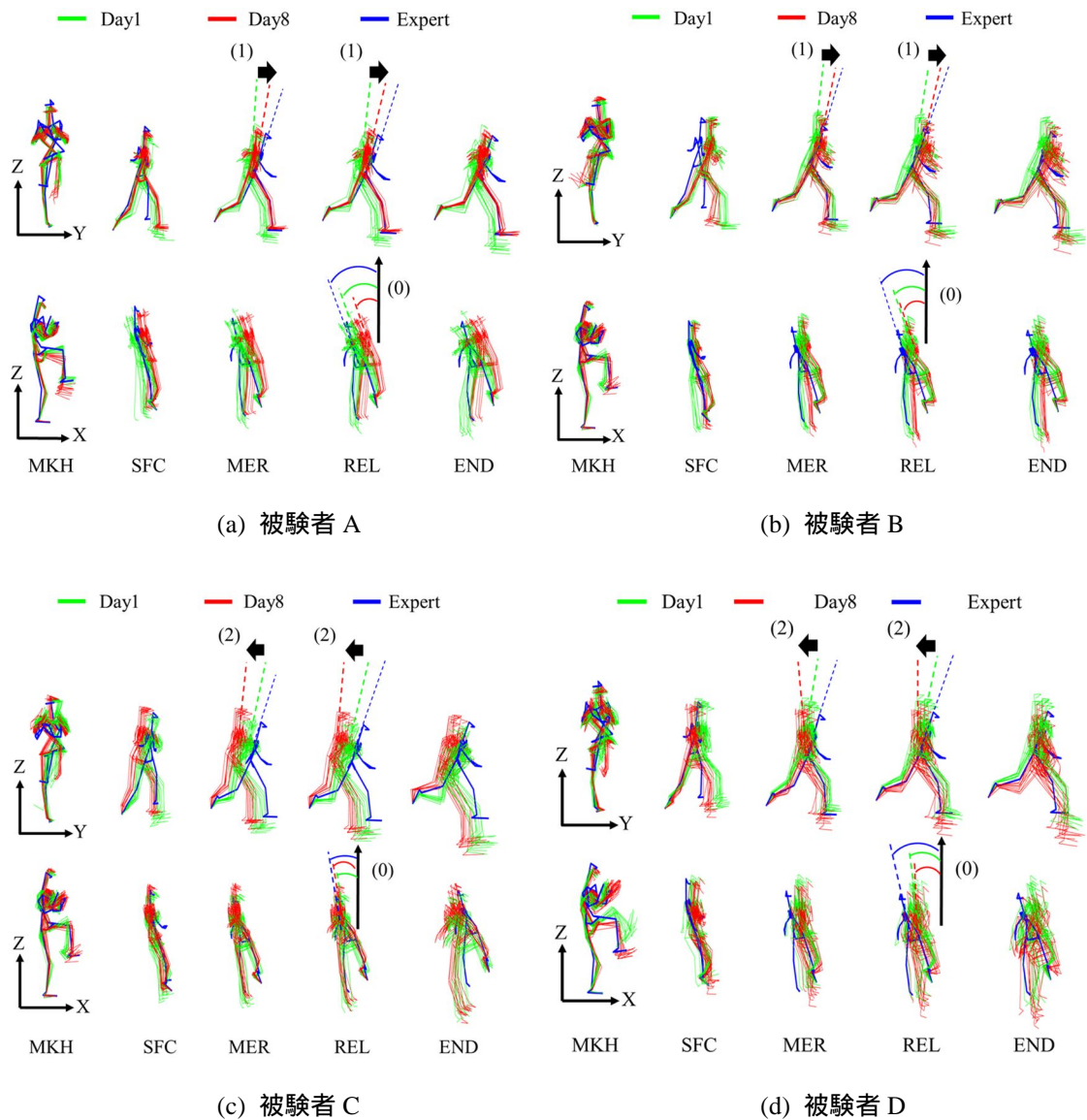


図 4 音信号運動教示によるシナジーの変容

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1 . 発表者名 Shusei Ohno, Kenta Matsumoto, Hiroshi Kobayashi, Takuya Hashimoto
2 . 発表標題 Analysis of Cooperative Actions in Baseball Pitching
3 . 学会等名 ISEA 2024 (国際学会)
4 . 発表年 2024年

1 . 発表者名 大野秀星、松本賢太、小林宏、橋本卓弥
2 . 発表標題 野球投動作における音信号を用いた教示システムの開発
3 . 学会等名 SI 2023
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 大野秀星、松本賢太、小林宏、橋本卓弥
2 . 発表標題 野球投動作における協調動作の解析
3 . 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 松本賢太
2 . 発表標題 音信号教示によるヒトの足踏みリズム動作の解析
3 . 学会等名 2022 JSME Conference on Robotics and Mechatronics
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 松本賢太, 和泉健吾, 橋本卓弥, 小林宏
2. 発表標題 慣性センサを用いたリズム動作分析システムの開発
3. 学会等名 第22回 公益社団法人 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 S12021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本賢太
2. 発表標題 音信号提示によるヒトのリズム動作の分析
3. 学会等名 第401回振動談話会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本賢太, 花岡恭介, 橋本卓弥, 小林宏
2. 発表標題 音信号指示によるヒトの足踏みリズム動作の解析
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2022
4. 発表年 2022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

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
---------	---------