

# 研究終了報告書

## 「Shared synergy を利用した高い汎化能力をもたらす模倣学習」

研究期間：2020年12月～2023年3月

研究者：沓澤 京

加速フェーズ期間：2023年4月～2024年3月

### 1. 研究のねらい

人間の教示動作をロボットに学習させる模倣学習は、人間がおこなう作業の自動化に有用であると期待されるが、新規な環境に対しては動作を教示しなおす必要がある。本研究では人間の動作生成の神経的基盤と考えられるシナジーを利用した模倣学習システムの実現を目指す。人間は環境が変化しても共通のシナジーを再利用して動作生成するという知見を利用して、人間の汎化能力を再現するシステムの実現を目指す。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究では、人間の運動から抽出される運動単位である筋シナジーを使った模倣学習システムの構築を目指した。シナジーは異なる動作から同様のものがしばしば観察される(このようなシナジーは特に shared synergy と呼ばれる)という知見から、シナジーの概念を模倣学習に組み込むことで、ロボットの汎化能力の向上ができると考えた。本研究の当初は、筋活動から抽出される筋シナジーを利用する想定であった。しかし、深部筋の測定や身体運動との対応関係の同定が模倣学習の障壁となったため、手先位置のような幾何学的な運動データを利用する方針に変更した。一方で、シナジーの新規動作への汎化能力を検証することで、シナジーを介して複数の技能を統合し、新規動作を生成できることを確かめた。これはまさしく shared synergy の概念に対応する結果である。また、シナジーを利用することで、教示動作の時空間的な構造を捉えた模倣学習システムを開発することに成功した。このシステムによって、学習効率の向上だけでなく新規動作の生成が可能であることも確かめられた。加速フェーズにおいては環境との適応的な接触を実現するためにインピーダンス制御との組み合わせを模索し、時空間的に可変な制御剛性のシナジーを抽出することは実現できなかったものの、インピーダンス制御を適用することで接触力の低減や環境の機械的拘束を利用した位置決めの様子が観察できた。最終的に、模倣学習にシナジーを応用して汎化能力を向上するという当初の目的は、おおむね達成できたといえる。

#### (2) 詳細

##### 研究テーマ A「筋活動を用いたロボット制御」

初期段階として、人間の筋活動をロボット制御に利用することを試みた。筋活動を用いたロボット制御は[Artemiadis and Kyriakopoulos, 2010]などで実現された例があるので、それらを参考に制御システムの実装を試みた。本手法では、筋活動量と関節角度との関係を状態空間モデルで表現し、このモデルのパラメータを推定することで入出力関係を推定した。

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t, \quad y_t = Cx_t + Du_t$$



ここで  $u_t$  は筋活動量、 $y_t$  は関節角度、 $x_t$  は状態変数(直接観測されない)である。筋活動量は Delsys 社の筋電位センサで上腕二頭筋、上腕三頭筋、三角筋前部、三角筋後部の 4 筋肉の筋電位を測定し(図 1 左)、それを正規化・平滑化することで求めた。関節角度は肩、肘、手首につけたマーカ位置をモーションキャプチャで測定し、それらの位置関係から算出した。状態変数の次元数を 10 として推定をおこなったところ、図 1 右の結果を得た。肩関節の角度は 7 deg 程度の誤差で推定できたが、肘関節は 16.7 deg と大きな推定誤差であり、特に肘が屈曲するときの誤差が大きく観察された。電極のわずかな位置ずれによって上腕二頭筋の測定時に大きなノイズが混入したことが推定誤差の要因のひとつと考えられる。

以上のように、筋活動を用いた制御の実現に取り組んだものの、筋活動計測の困難さとモデリングの困難さから、多自由度の運動への発展は難しい判断した。以降では、筋活動の代わりに関節トルクや手先位置などの物理量を扱う。

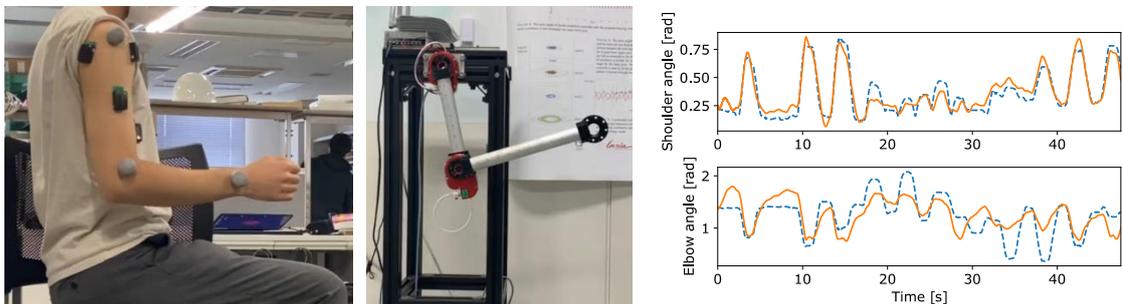


図 1 関節角度の推定結果(青色:角度の実測値、橙色:筋活動量からの推定値)

#### 研究テーマ B「シナジーの汎化能力の検証」

本研究の要のひとつであるシナジーの汎化能力を調査するため、シミュレーション環境の 7 自由度アームを用いた検証をおこなった。異なる動作から同様のシナジーが抽出されること、すなわち shared synergy が観察されることは多く報告されている。その一方で、実際にシナジーを再利用して新しい動作を生成できたという報告は少ない。特に、複数のシナジーのレパートリーの組合せによる効果は検証されていなかった。本研究テーマでは、冗長な自由度を有する腕のリーチング動作を取り上げて、シナジーを介することで複数の技能を統合し、新規な技能動作が生成できることを示した。具体的には、水平面上の目標位置へのリーチング動作と矢状面上の目標位置へのリーチング動作をそれぞれ個別に強化学習した後、それぞれからシナジーを抽出、統合し、前額面上の目標位置へリーチングできることを示した(図 2)。この目標位置は、それぞれの強化学習方策でも、各動作から抽出されたシナジーでも達成できず、両動作のシナジーを組み合わせることによってのみ達成できた。すなわち、シナジーを介して複数の技能を統合し、それによって新しい技能動作を生成したと言える。これはシナジーの潜在的な汎化能力を端的に示す成果である。

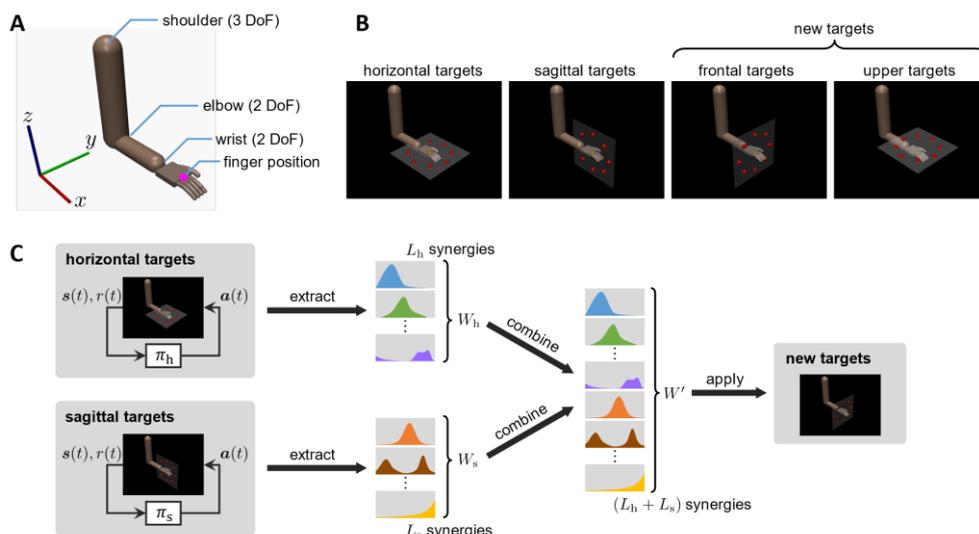


図 2 シナジーの汎化性能の検証

研究テーマ C「シナジーを使った模倣学習システムの実装」

シナジーを用いた運動生成ニューラルネットワークと、それを用いた模倣学習システムの実現をおこなった。time-varying シナジーと呼ばれるシナジーの一種を用いた模倣学習システムを実装した(図 3)。教示動作をシナジーとその活性パターンに分解し、ニューラルネットワークに活性パターンを学習させる。シナジーはデータセットに共通の要素動作であり、活性パターンは各教示動作でシナジーがいつどのように使われるかという時空間的構造を表現するものと考えられる。よって、提案するシステムを利用することでニューラルネットワークは教示動作の時空間的構造を効率的に学習できるものと期待される。実装した模倣学習システムを、ラテン文字の筆記体の書字タスクで検証した。結果として、提案システムによって、より小さなニューラルネットワークで動作が学習できることと、未学習の動作も生成可能なことが示された。また、得られたニューラルネットワークは、実機の制御偏差などが生じる状況でも頑健に動作生成することができた(通常のニューラルネットワークでは、誤差が積み重なって暴走してしまった)。この成果は、シナジーを模倣学習に応用することで汎化性能と頑健性が向上可能なことが示されたといえる。

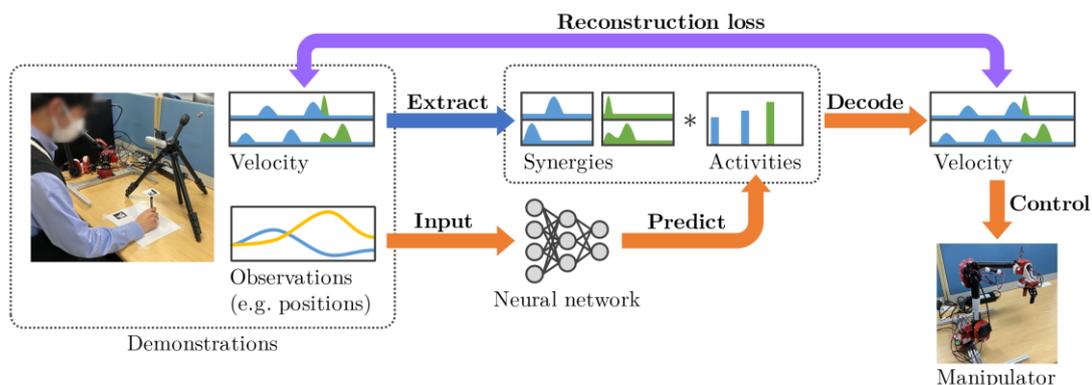


図 3 模倣学習システムの概要

#### 研究テーマ D「重ね合わせ可能な可変制御アドミッタンスの設計」

その他に、模倣学習システムとの統合は途上なものの、インピーダンス制御を使った運動計画に関する知見を報告した。インピーダンス制御は環境とのやさしい接触を実現する技術であり、環境との接触を伴う動作でしばしば利用される。さらに、制御インピーダンスを可変にすることで、環境と接触した際の運動を適応的に変更できることも示されているが、その現象を活用する方法は確立されていない。本研究テーマでは、可変インピーダンス制御の設計を空間の座標変換として記述することで、座標変換の重ね合わせとして複雑な制御インピーダンスが設計可能なことを示した。この方法を用いて可変インピーダンスを設計し、接触状態に応じて運動を切り替えることで嵌合タスクを遂行できることを示した(図 4)。線形な重ね合わせが可能という性質はシナジーとも共通の性質であり、制御インピーダンスをシナジーと同様に扱える可能性を示唆している。これは当初の計画では想定していなかったものであり、さらなる発展が可能と期待する。

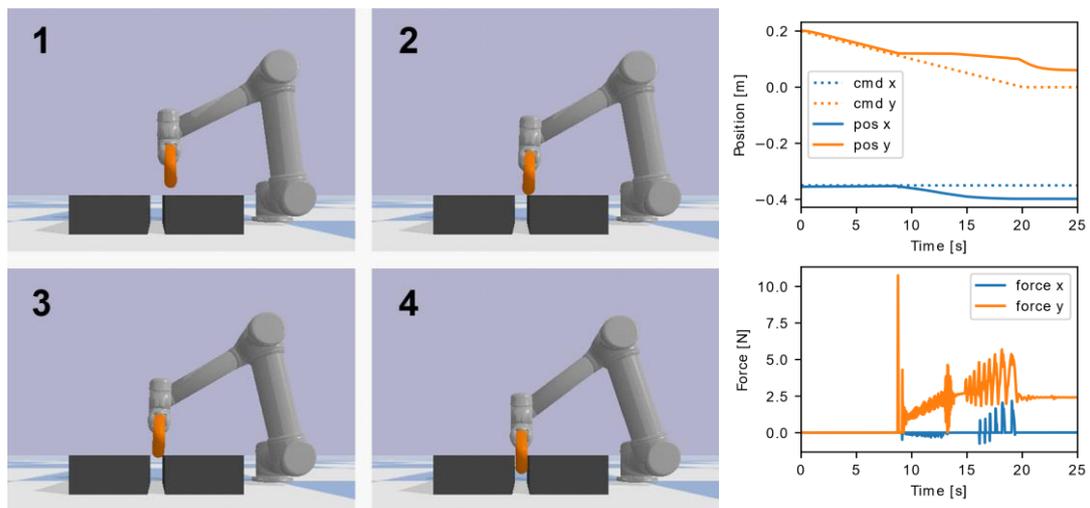


図 4 制御インピーダンスの設計による嵌合タスク。左: 動作中の画像、右: 位置と力の応答。制御インピーダンスを適切に設定することで、接触時の運動を目標位置へ誘導できる。

#### 研究テーマ E「インピーダンス制御と組み合わせたシナジー模倣学習システムの構築」

加速フェーズにおいては、シナジーを用いた模倣学習システムにインピーダンス制御を組み合わせることを試みた。研究テーマ C で開発された模倣学習システムは学習の安定性と汎化能力とを向上できると期待されるが、その一方で短期的な動作のパターンを事前に決めてしまうために環境と接触した際の咄嗟の動作適応が難しい。そこで、環境と接触した際の局所的な適応をインピーダンス制御で実現することを目指して、環境との接触を伴う作業への応用を試みた。

当初の予定では遠隔操作技術であるバイラテラル制御を使って教示した後、制御剛性(制御インピーダンス)を推定してから位置のシナジーと剛性のシナジーとをそれぞれ抽出し、模倣学習に用いる計画だった。しかし研究を進めるうちに、教示動作から操作者の制御インピーダンスと環境の機械インピーダンスとを区別して推定することが難しいとわかった。そこで、制御剛性が一定であると仮定して仮想的な平衡位置を算出し、仮想平衡位置の軌道からシナジーを抽出して模倣学習に使うという方法を採用した。教示時は図 5 左に示すバイラテラル制御系によってロボットを遠隔操作して動作を記録し、操作者側(Leader)が一定の制御剛性をもっていたとみなしてモデ

ル化し、平衡位置の軌道からシナジーを抽出する。最終的には図 5 右のように、シナジーを使ったニューラルネットワークを組み込む。

以上のような方法を使って引き戸を開けるタスクを学習させたところ、扉に手先を軽く押し付けることで安定的に取手を掴む様子が観察された(図 6)。成功率は 60%と高くはなかったものの、制御剛性を仮定しない方法と比べて成功率に 20%の向上がみられた。また、引き戸に過剰な力を加えることがなく、より安全性の高い挙動を示した。これはインピーダンス制御との組み合わせによって局所的な適応(柔らかい接触動作や環境の機械的拘束を利用した位置決め性能向上)が実現された例であると言える。一方で、制御剛性を一定としたために手先位置の上下方向のぶれが大きくなり、引き戸の取手を掴み損ねる様子が見られた。この課題を解消するには時空間的に剛性を可変にする必要があるが、その実現は今後の課題として残った。

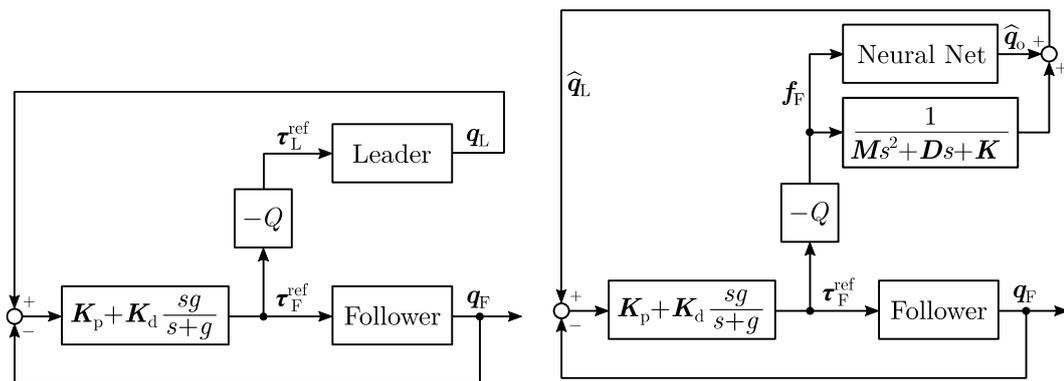


図 5 制御系の概要(左: 教示時、右: 学習後)

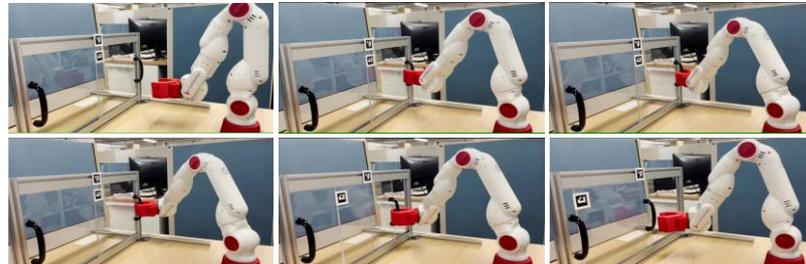


図 6 提案手法によるドア開けタスクの様子

### 3. 今後の展開

本研究の成果を踏まえて、今後は複雑な運動の学習、計画、生成が可能なロボットの実現に向けて取り組むたいと考えている。人間は過去に学習した運動技能を組み合わせたり、動作の手順を計画したりすることで、高度に知的な作業を実現している。再利用可能な運動要素であるシナジーは、そのような能力をロボットに実現するひとつの鍵となりうる技術と期待する。また、深層学習は入力データからの特徴抽出と構造化については発展著しいものの、ニューラルネットワークの出力である運動についてはそのような知見はいまだ少ない。この点においても、シナジーの概念は深層学習のロボットへの応用においてさらなる発展につながる可能性が期待される。

将来的には本研究のアイデアを起点に、5 年 10 年の長期的単位でロボットの知能化に取り組むたい。より具体的には、シナジー抽出の技術を発展させて運動の抽象的な特徴量を抽出し、そ

の抽象的なレベルで運動計画をおこなうシステムへと発展させたいと考えている。最終的には、多品種少量生産のような産業応用につなげることを目指したい。

#### 4. 自己評価

研究目的の達成状況としては、提案の核心的なアイデアの検証には至ったものの、そのインパクトを十分に示しきれなかったと評価する。当初の計画から外れた点があったものの、「シナジーを利用して模倣学習の汎化性能を向上する」という点についてはシステムの実装と実験的検証を示すことができた。また、time-varying シナジーによって教示動作の時空間的な構造を抽出、学習するというアイデアは、当初は想定していなかった成果であり、さらなる発展が期待される。一方で、応用上の価値を示せるような具体的かつ実用的なタスクの実装までは至らなかった。その点で、本研究で提案した技術の拡張性とその限界は十分に示しきれなかったと考える。

研究の進め方などについては、当初の計画から外れたこともあり、想定通りの実施および予算執行ができなかったと考える。また、研究成果の発表についても、想定より遅れ気味であり、これにより潜在的な学術的・社会的インパクトを発信しきれなかった側面があると感じる。そのため、期間内においては十分な波及効果をもたらすことができなかった。しかし、研究提案の核心的なアイデアについては実現することができ、かつ、ロボットの運動学習の効率化という今後の注目度の高い分野での成果を上げたことから、将来的な波及効果は期待できると評価する。

研究者個人の成長という点においては、Shared シナジーと模倣学習の組合せや、それによる教示動作の時空間的構造の学習といったアイデアの研究により、独創性のある研究を打ち出せたと考える。これは研究者の個の確立に大いに貢献したと評価する。また、ACT-X での研究や交流を通じて、専門外の分野を含め招待講演の機会を得るなど(その他成果 6、8、11)、人的ネットワークの拡大にもつなげることができたと評価する。

#### 5. 主な研究成果リスト

##### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 2件

1. Kyo Kutsuzawa and Mitsuhiro Hayashibe, "Imitation Learning with Time-Varying Synergy for Compact Representation of Spatiotemporal Structures," IEEE Access, vol. 11, pp. 34150-34162, 2023. (in press)

Time-varying シナジーと呼ばれるシナジーの一種を用いた模倣学習システムを提案した論文。人間の動作の多くは、より細かな要素動作を組み合わせると考えられる。教示動作を要素分解することで、より長期かつ複雑な動作を学習したり、組合せを変えて新規動作を生成したりできると期待される。本研究では、教示動作をシナジーに分解し、ニューラルネットワークにシナジーの活用パターンを学習させる手法を提案した。書字タスクで検証をおこない、提案手法によって小さなモデルでもより安定的に、新規動作の生成も可能であることが示された。

2. Kyo Kutsuzawa and Mitsuhiro Hayashibe, "Motor Synergy Generalization Framework for



New Targets in Multi-planar and Multi-directional Reaching Task,” Royal Society Open Science, vol. 9, no. 5, p. 211721, 2022.

シナジーを利用して新規動作が生成できることを示した論文。ヒトや動物は、シナジーと呼ばれる要素動作を組み合わせることで動作生成していると考えられている。異なる動作から同様のシナジーが抽出できることなども報告されており、シナジーの再利用が運動学習に効果的なことが示唆されている。しかし、シナジーの汎化能力、特に、複数種類の動作のシナジーの組合せの汎化能力については検証されていなかった。本論文では、7 自由度の腕の到達動作(目標位置へのリーチング)を例に挙げ、複数種類のシナジーのレパートリーを組み合わせることで、新規動作への汎化が可能となることを報告した。

## (2) 特許出願

研究期間全出願件数: 0 件(特許公開前のもも含む)

## (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 沓澤京, “Shared Synergy を利用した高い汎化能力をもたらす模倣学習,” 日本ロボット学会誌, vol. 41, no. 8, pp. 661-664, 2023.
2. Kyo Kutsuzawa, “Motor Synergy Generalization Framework for New Targets in Multi-planar and Multidirectional Reaching Task,” the 2nd International Symposium on Hyper-Adaptability, I-29, 2023. (Poster)
3. 沓澤京, 林部充宏: “時変シナジーを利用したドア開けタスクの模倣学習,” 第 41 回日本ロボット学会学術講演会, 2022, 3K2-03.
4. シンポジウム講演「シナジーを利用した模倣学習」2023 年電気学会産業応用部門大会、2023 年 8 月 22 日
5. Kyo Kutsuzawa and Mitsuhiro Hayashibe, “Synergy-Based Motor Learning for Improving the Spatial and Temporal Generalization Ability,” the 9th IEEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, 2023.
6. 招待講演「ロボットの運動制御と深層学習技術の応用例」日本結晶成長学会 新技術・新材料分科会 第 2 回研究会「新技術・新材料開発に向けたデータ駆動技術の応用」、2023 年 3 月 3 日  
(URL <https://www.jacg.jp/jp/about/newtech/20230303.pdf>)
7. Kyo Kutsuzawa and Mitsuhiro Hayashibe, “A Geometric Design Method for Variable Impedance Parameters in Assembly Tasks,” the 8th IEEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, 2022.
8. 招待講演「動作の時空間的構造を利用した模倣学習」第 69 回 自律分散システム部会研究会「若手研究者による模倣学習・強化学習の新展開」、2022 年 12 月 13 日  
(URL <https://www.sice.or.jp/das/eventcalendar.html>)
9. Kyo Kutsuzawa and Mitsuhiro Hayashibe, “Motor Synergy Generalization Framework for New Targets in Multi-planar and Multi-directional Reaching Task,” the 33rd 2022 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, 2022.



10. 沓澤京, 林部充宏: “Time-varying synergy を用いた動作の時空間的構造抽出による模倣学習,” 第 40 回日本ロボット学会学術講演会, 2022, 2K3-01.
11. 招待講演「ロボットの運動制御における深層学習の応用」トライボロジー技術への AI の活用を考える研究会、2021 年 8 月 31 日  
(URL <https://www.tribology.jp/unit/s-105/past.html>)