

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00370

研究課題名(和文) 高度なマニピュレーション作業における失敗からの回復技能の解明

研究課題名(英文) Explication of the error recovery technique in an advanced manipulation

研究代表者

中村 晃 (NAKAMURA, Akira)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員

研究者番号：30357660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、家庭用電気製品のロボットによる修理等で必要とされる非定型の高度なマニピュレーション作業を対象に、作業の階層化とエラーのクラス化を考慮したエラーリカバリー手法を適用することによって、失敗からの回復技能を解明し、作業の信頼性を向上させることを目的とするものである。本研究テーマで導き出されたエラーリカバリーの技法は作業の失敗から回復するための新しいアイデアと理論の体系化を提供する。

研究成果の概要(英文)：It is necessary to accomplish a high degree of manipulation task which is atypical in repair of the home electric appliance by using a robot. Error often occurs in such an irregular advanced manipulation. In this research, a restoration skill from failure is clarified and reliability to achieve the task is improved, by applying error recovery using task stratification and error classification. The new idea of recovery from manipulation error and the systematization of theory are derived according to a technique obtained by this research.

研究分野：ロボット工学

キーワード：エラーリカバリー リペアロボット メンテナンスロボット マニピュレーション 2指ハンド グリッパ

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 資源を有効利用し廃棄物を減らすことは環境問題を考える上で重要なことであり、家電リサイクル法の施行に代表されるように、日常使う家庭用品は使い捨てから再利用の時代へと変化しつつある。それゆえ、壊れたり故障したりした家庭用品を修理する場で活躍するロボットの需要も今後増加していくものと思われる。ここでは、そのような音響・映像機器や計算機等家庭で利用される電気製品のリペアを行うロボットに必要な技術の先導的な研究を行う。

(2) 電気製品や自動車等の生産工場において組み立てを行うロボットについては様々な研究がなされてきた。生産ライン上での作業は、定まった動作の繰返しが多く、精度を上げることによって信頼性を向上させることができる。しかしながら、修理を行う場で働くロボットは、型にはまった作業の繰返しでは目的は達成されない。作業がパターン化されないゆえ、失敗する可能性も高くなり、リペアロボットの信頼性を向上させるためにはエラーリカバリー技能をシステムに組み込むことが必要となる。本研究では、リペアを行うロボットに必要な技術のうち、エラーリカバリー技能を取り上げ、エラー状態の分析や効率の良いリカバリー経路の導出など作業の信頼性を向上させるために最も重要な問題の解明を行う。

## 2. 研究の目的

我々は、ロボット作業の階層化とエラーのクラス化によってエラーリカバリーを行う方法を提案したが、エラーのクラス化分類によって、起こったエラーの原因を考慮して復帰のためのプランニングを立てることが可能になり、本質的なリカバリーを行うことができる。さらに、タスクの階層化表現を用いることにより、どの段階に戻ってリカバリーを行えばよいのか明確にすることができる。

(1) 本研究課題においては、この手法を電気製品のリペアのような非定型の高度なマニピュレーション作業に適用し、失敗からのリカバリー技能の解明を行い、失敗が起こる確率の高い複雑な作業も成功に導くようにする。

(2) ロボットを用いた修理作業の信頼性の向上が可能となることにより、修理業界へロボット導入の機運を高める。

## 3. 研究の方法

(1) 電気製品等家庭で扱う製品のリペアを行うロボットシステムの構築

はじめに、リペアを行うマニピュレーションロボットについて考える。電気製品の修理作業の内容は、折り曲げのような形状変形を行う作業よりも部品の取付けや脱着とい

った高度な技能が必要な作業が多くなり、現状のマニピュレーションシステムでは対応が困難である。それゆえ、精度が高く、かつ、把持時の指の力あるいは指どうしの幅を指定できる2指ハンドが必要になる。本研究においては、それらの仕様を満足するハンドの設計及び製作を行う。

## (2) エラー状態の分析

ロボットを用いた作業で起こりうる様々なエラーを分析し、エラー状態の統計的表現を行う。これにより、発生したエラーのカテゴリーを決めることができる。さらに、カテゴリーごとにエラー原因との関係を解明する。

## (3) 効率の良いエラーリカバリー経路の解明

ロボット作業の階層化とエラーのクラス化により、理論上は様々なエラーリカバリーの経路が導出される。それらの中から実現可能なエラーリカバリーの経路を選び、さらに信頼性の観点からリカバリー経路としての相応しさから順序付けを行う。それにより、失敗が起こったときにどの段階に戻ってどのような作業をするのが最もよいのかというエラーリカバリーの本質的な問題を明らかにする。

## (4) エラーリカバリーに適したセンシング方法の解明

ロボット実行の際、エラーの判定のために、要所所でビジョンシステム等を用いてセンシングを行う。理想的には、できるだけ多くのタイミングでエラー判定のためのセンシングを行うことが望ましいが、非常に多くのセンサが必要になることや作業の流れを妨げること等の問題から現実的には難しい。それゆえ、どのようなセンサを用いてどのタイミングで行うのが良いかを明らかにする。

## 4. 研究成果

(1) 電気製品等家庭で扱う製品のリペアを行うロボットシステムの構築

家具、食器、文房具など家庭用品にはたくさんの種類のもが存在するが、本研究では音響・映像機器のような電気製品を第一の修理対象物とする。電気製品の修理は、電機メーカーの修理部門だけでなく、最近では複数の電機メーカーの修理を一手に引き受ける修理専門会社もメジャーな存在になりつつあり、家庭製品の修理の中でも最も将来性がある分野と言える。

電気製品の修理は、折り曲げのような対象物の形状を変える作業よりも部品の取付け・脱着といった高度な技能を必要とする作業が多くなり、精度の高い作業を実行でき、かつ、把持対象物を壊したり落としたりすることなく要求される把握タスクを実現可能な2指ハンドが必要になる。市販されている

2指ハンドは開閉のみを行うものがほとんどであり、ここで対象となる高度な作業を行うことは困難である。それゆえ、リペアロボットが実装するマニピュレーションシステムとしては、精度が高く、かつ、開き幅あるいは力の大きさ等を自由に指定できる高技能な2指ハンドを設計し装填する必要がある。本研究においては、それらの仕様を満足するような2指ハンドの設計及び製作を行った。作成した2指ハンドを図1に示す。

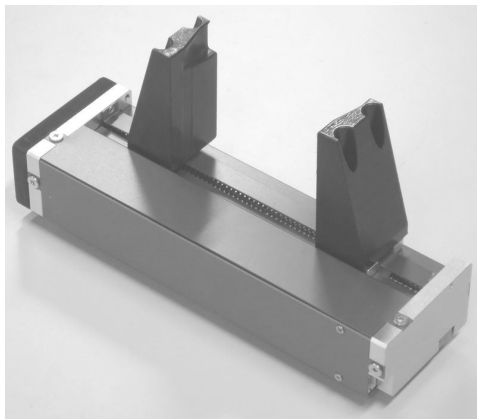


図1 製作したリペアロボット用2指ハンド

## (2) エラー状態の分析

同じ作業の繰返しを行う製造ライン上のロボットと異なり、リペアロボットは種々多様な動作プリミティブで構成されるシーケンスを実行するものであり、エラーが起こりやすく、さらに様々なタイプのエラーが発生する。エラーが起こったとき、それをリカバリーに結びつけるためには、ロボットを用いた作業で起こりうる様々なエラーを分析しておくことが必要である。

本研究においては、エラー状態を分析し、統計的な表現を導き出す。これにより、発生したエラーのカテゴリーを容易に決定できるようになる。具体的には、エラーのカテゴリーをクラス1：実行エラー、クラス2：プランニングエラー、クラス3：モデリングエラー、クラス4：センシングエラーのように分類し(図2)、各カテゴリーでエラーの原因との関係性を導き出す。実際に発生したエラーの内容を調べることによって、その発生原因を推定の形で特定する。推定の信頼度を高めるためには、リペアロボットとして稼働しているマニピュレーションシステムの挙動を十分に理解していることが重要である。

信頼性の高いエラー原因の推定によりシステムの修正が正しく行われれば、それ以降エラーの発生は少なくなる。このように、エラーの原因を導き出しシステムを修正するという本質的なエラーリカバリーを行うことが本研究の特徴であり、かつ、研究テーマの核心にあたる。(参照:[雑誌論文])

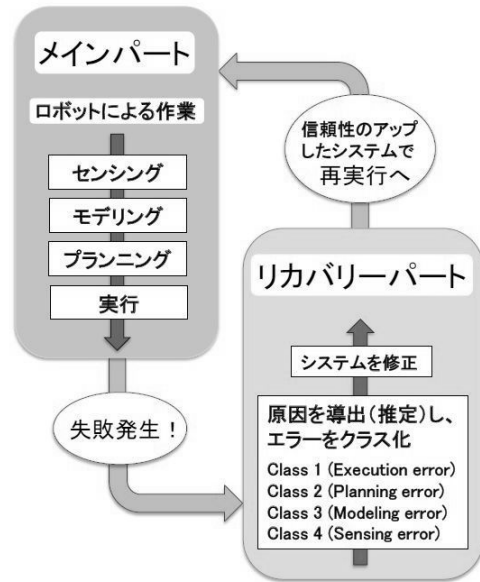


図2 エラー状態の分析とリカバリー

## (3) 効率の良いエラーリカバリー経路の解明

電気製品の「リペア・タスク」の多くは、「外箱を外すタスク」「壊れた部品を外すタスク」「新しい部品を取付けるタスク」「外箱を付けるタスク」というサブタスクのシーケンスで構成される。また、「外箱を外すタスク」は「ネジを外すタスク」「外箱を本体から脱着し遠ざけるタスク」等で構成されるように、それぞれのサブタスクは、さらに下位のサブタスクによって構成される。このように、ロボットの実行タスクは階層表現で記述することができる(図3)。

また、我々のエラーリカバリーの手法は、(2)で記したように実行エラー、プランニングエラー、モデリングエラー、センシングエラーといったエラーの原因に基づいてエラーのクラス化を行い、実際にエラーが起こったとき、そのクラスに基づいてエラー原因を選択し、リカバリープランニングを行うというものである。

ロボット作業の階層化とエラーのクラス化により、理論上は様々なエラーリカバリーの経路が導出される。それらの中から実現可能なエラーリカバリーの経路を選び、さらに信頼性の観点からリカバリー経路としての相応しさから順序付けを行うことが可能である。本テーマにおいては、失敗が起こったときに、入力に簡単な修正を加えてそのまま作業を継続するのがよいのか、あるいは、前のステップに戻るのがよいのか、さらに後者の場合(図3)、どの段階に戻ってどのような作業をしたらよいのか、というエラーリカバリーの本質的な問題を明らかにすることをを行った。特に現実的な問題として、プログラムの再利用性という観点からリカバリー

経路の選択を行う方法を示した。これにより、作業者の負担を軽減したりリカバリー作業を行うことが可能になる。(参照:[雑誌論文])

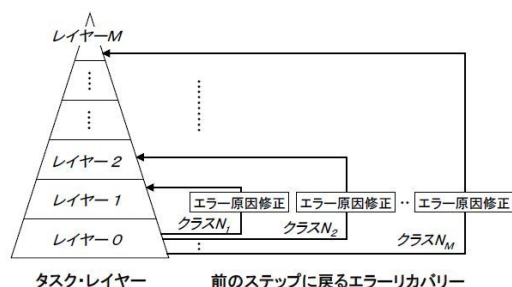


図3 上位レイヤーへ戻るリカバリー

#### (4) エラーリカバリーに適したセンシング方法の解明

エラーリカバリーを伴うロボットの作業においては、エラーの判定のために、要所所で主にビジョンシステムを用いてセンシングを行う。エラーをできるだけ回避するという観点からは、多くのタイミングでエラー判定のためのセンシングを行うことが望ましい。しかしながら、システムのハード系及び実行系の観点からは、大量のセンサが必要になること、及び、作業の流れの寸断や時間の制約が問題になることなどから現実的には難しい。それゆえ、本テーマにおいては、どのようなセンサを用いてどのタイミングでどの配置から行うのが良いかを明らかにした。

具体的には、(i) 複数の連続して実行される動作プリミティブに対して包括的にセンシングする方法、(ii) リカバリータスクの実行に重点をおいてセンシングをする方法、(iii) 実行が難しいタスクに重点をおいてセンシングをする方法、(iv) データ獲得に必要な範囲や精度が大きく変化するときセンシングを行う方法などをとりあげ、それぞれの場合において最適なデータ獲得のタイミングの導出を行った。

たとえば、(i)において、ある動作プリミティブ終了後の結果確認のためのセンシングがそのまま次の動作プリミティブ実行のために必要なセンシングデータを全て獲得できていればそれらのセンシングは統合できる。また、ピックアンドプレース作業を考えると、移動系のシーケンスと物体把持系のシーケンスで(iv)のようにそれぞれで大局的なセンシングと局所的なセンシングで大別して戦略を立てることができ、全体として効率の良いセンシングタイミングを導き出すことができる。これらを基本にすれば複雑なリペア作業でもセンシングタイミングの容易化を図ることができる。(参照:[雑誌論文])

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

中村 晃、永田 和之、原田 研介、山野 辺 夏樹、Error Recovery of Pick-and-Place Tasks in Consideration of Reusability of Planning, Journal of Robotics, Networks and Artificial Life, 査読有、2 巻、1 号、2015、22-25、DOI:10.2991/jrnal.2015.2.1.6

中村 晃、永田 和之、原田 研介、山野 辺 夏樹、Using Simplified Geometric Models in Skill-Based Manipulation for Objects Used in Daily Life, Artificial Intelligence Research, 査読有、6 巻、2 号、2017、100-110、DOI:10.5430/air.v6n2p100

中村 晃、永田 和之、原田 研介、山野 辺 夏樹、Estimation and Categorization of Errors in Error Recovery Using Task Stratification and Error Classification, Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, 査読有、4 巻、2 号、2017、163-167、DOI:10.2991/jrnal.2017.4.2.13

中村 晃、永田 和之、原田 研介、山野 辺 夏樹、The Suitable Timing of Visual Sensing in Error Recovery Using Task Stratification and Error Classification, Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, 査読有、4 巻、2 号、2017、134-137、DOI:10.2991/jrnal.2017.4.2.6

〔学会発表〕(計3件)

中村 晃、永田 和之、原田 研介、山野 辺 夏樹、Estimation and Categorization of Errors in Error Recovery Using Task Stratification and Error Classification、2017 International Conference on Artificial Life and Robotics、2017

中村 晃、永田 和之、原田 研介、山野 辺 夏樹、The Suitable Timing of Visual Sensing in Error Recovery Using Task Stratification and Error Classification、2017 International Conference on Artificial Life and Robotics、2017

中村 晃、永田 和之、原田 研介、山野 辺 夏樹、Technique of Recovery Process and Application of AI in Error Recovery Using Task Stratification and Error Classification、2018

International Conference on  
Artificial Life and Robotics, 2018

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕(計0件)

〔その他〕

<https://unit.aist.go.jp/is/mrg/ci/projects.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 晃 (NAKAMURA, Akira)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員  
研究者番号：30357660

(2) 研究分担者

永田 和之 (NAGATA, Kazuyuki)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員  
研究者番号：10357634

原田 研介 (HARADA, Kensuke)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・特定フェロー  
研究者番号：50294533

山野辺 夏樹 (YAMANOBE, Natsuki)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員  
研究者番号：90455436