

# 失敗の場面に応じたロボットの振る舞いの自動生成に関する研究

Research about automatic generation of robot's behavior in its failure

安松 勇紀      岨野 太一      今井 倫太  
Yuuki Yasumatsu      Taichi Sono      Michita Imai

慶應義塾大学  
Keio University

In human-robot cooperative task, robot may sometimes fail. Robot, in particular humanoid robot must tell its failure to its partner. As one of the way that robot tells failure to human, we propose the Failure Expression Action (FEA), which is seemed that robot reacts about its failure. For achieving a natural human-robot interaction, the FEA is based on three things: robot's emotion, contingency and robot's intention. So we integrated of three actions to generate the FEA: Failure expression, Reflex and Gaze. We evaluated the effect of the FEA, and demonstrated that the FEA has the elements that are essential for human-robot interaction.

## 1. はじめに

コミュニケーションロボットの普及に伴い、人と協調してタスクを行うロボットは積極的に研究されている。これまで多くの研究が、協調タスクの中でロボットがどのように動き、協調タスクを進めていくかについて取り組んできた。しかし、ロボットはタスクの実行に失敗する可能性があるため、もし人の協調タスクを実行中にロボットが失敗をしてしまったとき、ロボットの失敗が人に伝わらなければ、協調タスクをうまく進行することができない。特に、人と生活空間を共有する人型ロボットでは扱われるべき重要な課題である。

本稿では、人型ロボットが人に失敗したことを伝える手段の一つとして、図1のようなロボットが失敗に対して反応しているように見える振る舞い(失敗表現行動)について考える。ロボットが失敗表現行動をとることにより、人はロボットの失敗に気づき、ロボットを助けることで協調タスクが続行できるようになると期待される。

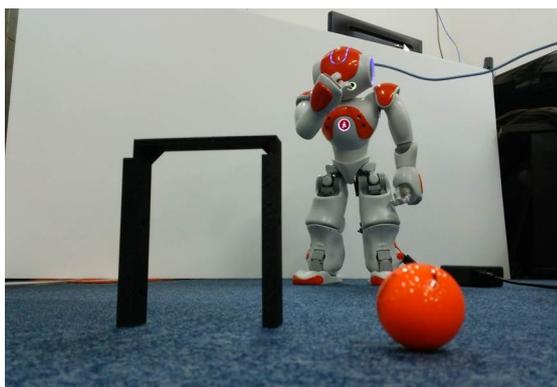


図 1: 失敗表現行動

失敗表現行動を含む多くのヒューマンロボットインタラクションの研究では、シナリオベースでインタラクションがデザインされている。しかし、ロボットがシナリオのどの時点で

連絡先: 安松勇紀, 慶應義塾大学理工学部情報工学科,

〒 223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1, 045-560-1070, yasumatsu@ailab.ics.keio.ac.jp

のような失敗をするかについて、無数の組み合わせが考えられるため、シナリオが複雑になるほど、失敗表現行動をシナリオの一部として固定的にデザインするのは困難になってくる。失敗表現行動を場面に応じて自動生成する研究ははまだ成されていないが、多くのシナリオで共通している振る舞いもあり、共通部分の一部だけでも失敗表現行動として自動生成されれば、失敗表現行動のデザインを簡潔化できる。よって、場面に応じた失敗表現行動の自動生成は協調タスクを行うロボットの設計を考える上で重要である。本稿では、失敗の場面に応じて失敗表現行動を自動生成することを目的とする。

失敗表現行動の自動生成を実現する上で、失敗表現行動として満足しなければならない要素について考える必要がある。人とロボットのインタラクション、特に人とロボットの協調タスクを円滑なものにするためには、ロボットの現在の状態を人に把握させる必要があり、ロボットは感情表出、今性のある振る舞い、意図表示の3つの要素を満たすよう設計しなければならない。ロボットの感情表出は、人型ロボットを対象とする場合、特に重要な事項である。人間は人型ロボットに対して人どうしの場合と同様にメンタルステートを持つと想定してインタラクションするため、失敗表現行動においてロボットの失敗に対するメンタルステートを可視化することは重要である。また、協調タスクにおいてロボットが人のコミュニケーションの相手として認知されるためには、人がロボットと一緒に環境を共有し、タスクを行っていることを実感させるような振る舞いが必要である。本稿では、人からの働きかけや、環境変化に即座に反応し、目の前の状況や文脈を共有している感覚を人に持たせる振る舞いを今性のある振る舞いと呼ぶ。さらに、ロボットが何をしたいかについて人に伝えるために、ロボットの注意や意図を表出させることは重要である。これらの要素を満足させた失敗表現行動を行うことで、人とのインタラクションを中断させることなくロボットの失敗を人に伝えることができ、また、失敗を通して人と協調感を生み出すことが可能になる。

本稿では、人との協調における人型ロボットの満たすべき3つの要素を考慮した失敗表現行動を自動生成する方法について提案する。まず、失敗を表わす典型的な行動表現(失敗表現)をとることで、ロボットのメンタルステートを可視化する。次に、反射行動を導入することで、今性のある振る舞いを実現する。さらに、注視行動を行うことでロボットの注意対象を表出し、ロボットの意図を示すことを試みる。失敗表現と失敗時に

行われた反射行動および注視行動の組み合わせにより、失敗表現行動を生成する。

## 2. 失敗表現行動

### 2.1 関連研究

人とロボットの協調タスクにおいて、ロボットがタスク中にどのように行動を生成するかについての研究がされてきた [Amor 14][Whitsell 15]。しかし、これらの研究では、協調タスク実行時におけるロボットの失敗について考慮されていない。

また、失敗時にとるべき行動として、ロボットがタスクを続行できる状態まで自力で回復する行動についての研究が行われてきた [Yamazaki 10][Yamazaki 14]。これらの研究では失敗時にとる行動の自動生成は達成されているものの、失敗表現行動は実現できていない。よって、ロボットが自力で回復できない失敗をした場合、人に助けを求めることができないため、ロボットがタスクを続行することは不可能になってしまう。

失敗表現行動が実装されている例として、Kober らの研究が挙げられる [Kober 12]。しかし、失敗表現行動がシナリオの一部として固定的にデザインされているため、拡張性が少なく、他の失敗や他のシナリオに応用できない。

### 2.2 失敗表現行動の課題

人と協調タスクを行うロボットの研究ではロボットの行動の失敗について考慮されていない。失敗時に回復行動を自動生成する研究ではロボットの失敗表現行動は扱っていない。また、失敗表現行動の自動生成に焦点を当てた研究はなく、失敗表現行動が扱われていたとしても固定的な実装である。失敗の場面に応じて動的に自動生成する手法は実現できていない。

よって、本稿は協調タスクにおいてロボットが失敗時に場面に応じた失敗表現行動を自動生成する手法について取り組む。そのためには、失敗表現行動としてどのような行動をとるべきか考える必要がある。特に人と人型ロボットの協調においては、成立したインタラクションを壊すことのないように、ロボットは感情表出、今性のある振る舞い、意図表示の3点を満たす必要がある。上記3点の要素を満たす失敗表現行動をとることにより、たとえ人型ロボットが協調タスク中に失敗をしたとしても、協調タスクの中で成立したインタラクションを壊すことなく継続することができる。ここで言うインタラクションが壊れるとは、人型ロボットが失敗したにも関わらず、失敗に対するメンタルステートの変化を見せなかったり (感情表出の欠如)、失敗に対する即時的反応が無く人と同じ環境を共有している感じがしなかったり (今性の欠如)、ロボットがどのような目標を実現できずに失敗したのか分かりづらかったり (意図表示の欠如) した結果、人との間に齟齬が生じてしまうことを指す。

### 2.3 ロボットの感情表出

協調タスクにおいて、人は人型ロボットに対してメンタルステートを想定している。人型ロボットに対してインタラクションの場面ごとに人が想定するロボットのメンタルステートを可視化するために、ロボットは感情を表出しなければならない。

失敗表現行動は人に失敗を伝えるために行うため、失敗に対するロボットの感情表現は重要であると考えられる。ロボットが失敗したというメンタルステートを可視化するためには、頭を抱える、うなだれるといった失敗を表す典型的な行動表現が必要である。

### 2.4 今性のある振る舞い

ロボットが協調している相手にとって、コミュニケーションのパートナーであると思ってもらえるためには、ロボットが今性

のある振る舞いをするのが重要である。今性のある振る舞いは、人の働きかけや環境の変化に即時的反応することで、目の前の状況や文脈をロボットと共有している感覚を人に持たせることができる。人とロボットの協調タスクにおいて、人がロボットと一緒にタスクを行っているという認識を持たないと、人は協調感を得ることができない。人がロボットを協調タスクにおけるパートナーとして思うには、ロボットは今性のある振る舞いをとることが必要である。

今性のある振る舞いを満たす要因の一つとして、反応速度が挙げられる。例えば、人の呼びかけに対してすぐに振り向くことで、人はロボットが自分に反応したと感じ、ロボットに対する今性を感じることができる。すなわち、失敗に対して素早い反応を返すことで、ロボットが失敗を認識したことに人が気づくことができ、ロボットが失敗を表現する際にインタラクションの相手としての人からの認識を失わずに済むことができる。

### 2.5 ロボットの意図表示

ロボットが行動時の意図を示さないと、人はロボットの行動目的について知ることができず、協調タスクをうまく進行することができないとともに、ロボットが失敗したことを人は認識することができない。失敗は、起きた事象がロボットの行動目的に則っていないことが分かって初めて明らかになるので、ロボットの意図を表出することは大変重要な課題である。

人型ロボットを想定すると、ロボットの意図を表出する方法として、ロボットの視線の向きの利用が考えられる。ロボットが注意対象に視線を向けることで、ロボットの目的や意図を人に伝えることができる。

## 3. 失敗表現行動の自動生成

本稿では、人との協調における人型ロボットの満たすべき3つの要素を考慮した失敗表現行動を自動生成するシステムについて提案する。まず、失敗を表わす典型的な行動表現 (失敗表現) をとることで、ロボットのメンタルステートを可視化する。次に、反射行動を導入することで、今性のある振る舞いを実現する。さらに、人型ロボットの頭部の動きを用いた注視行動を行うことでロボットの注意対象を表出し、ロボットの意図を示すを試みる。失敗表現と失敗時に行われた反射行動および注視行動の組み合わせにより、失敗表現行動を生成する。

失敗表現をとることでロボットの失敗に対するメンタルステートを人に伝え、反射行動により人の行為や環境の変化に素早く反応することで人にロボットに対する今性を人に感じさせ、注視行動により失敗対象やロボットの注意を人に伝えることで、成立したインタラクションを壊すことなくロボットが失敗したことを人に伝える。特に、インタラクションのシナリオによらずに自動的に失敗表現行動が生成されるので、ロボット開発者は事前にシナリオに依存した失敗表現行動を用意する必要がなくなる。

本稿の失敗表現行動生成システム構成を図2に示す。

### 行動意図管理モジュール

ロボットはタスクを達成するという大きな目標を持っている。タスクを達成するために、ロボットは様々な行動を実行していく必要がある。タスク達成に必要な行動を最小単位に切り分けたものを単一行動とする。

行動意図管理モジュールはロボットがタスク達成のために取るべき単一行動と、単一行動実行後に到達すべき状態 (目標状態) を決定する。また、失敗時において自力でタスクに復帰するために回復行動を取るか否かの決定も行動意図管理モジュールが行う。

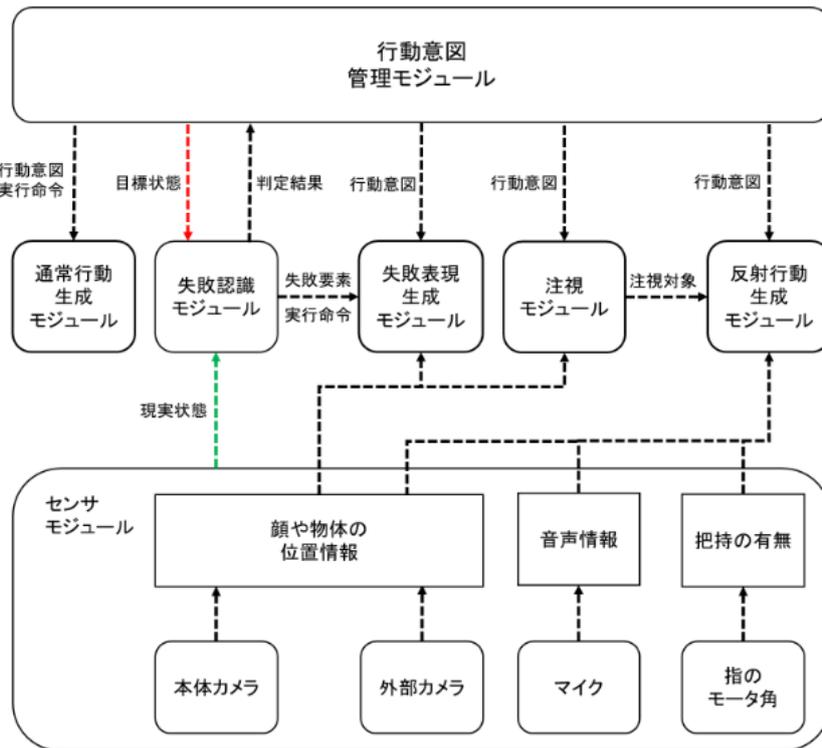


図 2: 失敗表現行動生成システム構成

### 通常行動生成モジュール

通常行動生成モジュールは、行動意図に基づきロボットの単一行動を生成し、実行する。単一行動実行後に失敗認識モジュールによる失敗の有無の判定が行われる。

### センサモジュール

センサモジュールは、環境情報やロボットの内部状態を取得し、各処理モジュールが利用できる情報に加工する。また、取得したセンサ情報を元にロボットの現在の世界状態（現実状態）を形成する。ロボット本体のカメラおよび外部カメラによる画像認識、マイクによる音声認識、指のモータの角度による把持検出によって環境から必要な情報を取り出した。

### 失敗認識モジュール

本稿では、失敗を「単一行動実行後の現実状態と、単一行動に対する目標状態との間に差異があること」と定義する。

単一行動実行後、失敗認識モジュールは目標状態と現実状態を比較する。ロボットは自分が認識できることができる事柄  $s$  の集合  $S = \{s_i\}$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) を世界状態として持つ。ただし、 $s$  は全て真理値とする。目標状態は行動意図管理モジュールにより、あらかじめ状態変数の真理値が決定されているものとする。また、現実状態はセンサモジュールから取得した数値情報を真理値に変換することで形成する。目標状態  $S^g$  と現実状態  $S^r$  の各状態変数を比較していき、 $s_i^g \neq s_i^r$  のとき、ロボットは失敗したと判定する。このとき目標状態と現実状態とで異なっている状態変数  $s_i$  の集合を失敗要素とする。

また、失敗認識モジュールは判定結果を行動意図管理モジュールにフィードバックする。行動意図管理モジュールは、失敗と判定された場合はタスクに復帰するための行動を、失敗していない場合はタスクの次のステップとなる行動を計画する。

### 失敗表現生成モジュール

失敗認識モジュールにより失敗と判定された後、失敗表現生成モジュールは失敗表現を生成し、実行する。あらかじめ用意された失敗を表わす行動表現の集合（失敗表現行動群）から場面に応じて行動表現を選択、組み合わせることで失敗表現を生成する。

### 注視モジュール

注視モジュールは、ロボットの注意対象を決定し、ロボットの頭部を動かすことでロボットの視線を向ける。ロボットの注意対象は、センサ情報や行動意図に基づき決定される。ロボットが注視対象を見失ったとき、反射行動が生成される。

## 4. 評価実験

### 4.1 実験目的

失敗表現行動生成システムを用いて、失敗表現行動の有無および失敗表現行動の生成に用いた3つの要素の有無により、協調タスクを行っている人にロボットの失敗が伝わるかどうかと、ロボットの動作に対する印象に変化が生じるかどうかを評価した。

### 4.2 実験方法

被験者にはロボットに物体を渡すタスクを通して、ロボットが失敗する場面を観察してもらった。実験の様子を図3に示す。ロボットの失敗時とする行動について、i) 失敗表現行動なし、ii) 失敗表現行動あり、iii) 失敗表現なし、iv) 反射行動なし、v) 注視行動なし、の5つの条件を用いた。各条件について、被験者（慶應義塾大学の学生8名、年齢22～26歳）による7段階評価のアンケートを実施した。

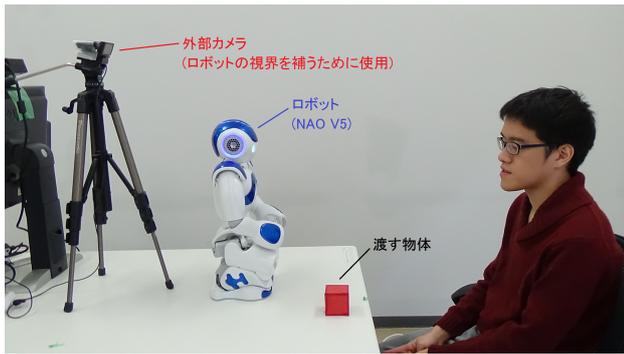


図 3: 実験の様子

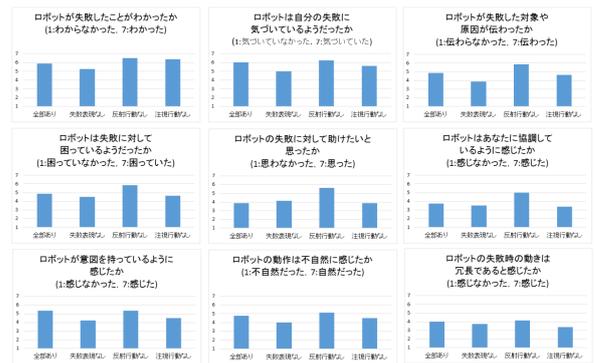


図 5: 失敗表現行動の構成要素の有無による評価の比較

### 4.3 実験結果

実験結果を図 4, 図 5 に示す。図 4 において失敗表現行動の有無による評価の違いについて比較するために、t 検定を用いて有意差があるかどうかを調べた。t 検定を用いた結果、ロボットが失敗した対象や原因が伝わったかについて、有意水準 10% で、ロボットは失敗に対して困っているようだったか、ロボットはあなたに協調しているように感じたか、ロボットが意図を持っているように感じたかについて、有意水準 5% で差異があると判定された。ロボットが失敗した対象や原因が伝わったことより、失敗表現行動をとることによりロボットが人に失敗を伝えることができることがいえる。また、失敗に対して困っているように見えたことはロボットの失敗に対するメンタル状態が可視化できているといえる。加えて、ロボットが人に協調しているように人が感じた点より、今性のある振る舞いが実現できているといえる。さらに、ロボットが意図を持っているように感じた点より、ロボットの意図が人に伝わっていることがわかる。以上より、失敗表現、反射行動、注視行動の組み合わせにより生成された失敗表現行動は、人との協調タスクに必要な 3 つの要素を満たすことができていることがわかる。

図 5 では、失敗表現行動に用いた失敗表現、反射行動、注視行動の有無による評価の違いについて比較するため、Tukey 法を用いて有意差があるか調べたが、各項目に有意差は見られなかった。この理由として、タスク設定が悪かったため似たような失敗になりやすく、失敗後の行動も似たり寄ったりになってしまったことで評価に差が表れなかったと考えられる。



図 4: 失敗表現行動の有無による評価の比較

## 5. 結論

本稿では、失敗表現行動を失敗の場面に応じて自動生成するシステムについて提案した。ロボットの感情を表出するために失敗表現を、今性のある振る舞いを満たすために反射行動を、ロボットの意図を表示するために注視行動を行い、それらの行動を組み合わせることで人との協調タスクにおける必要な要素を満たすような失敗表現行動を生成した。

失敗表現行動生成システムにより、失敗の場面に応じて動的に失敗表現行動を生成することが可能になった。このシステムを用いることにより、従来のように失敗表現行動をシナリオベースにデザインする必要性がなくなり、ロボット開発者の失敗表現行動の設計に対する負担は減る。これにより、開発の生産性の向上が期待できる。

また、失敗表現行動の有無について比較する実験を行い、失敗表現行動をとることにより、インタラクションの成立を壊すことなく人に失敗を伝えることが可能であることが示された。

## 参考文献

- [Amor 14] H.B.Amor, G.Neumann, S.Kamthe, O.Kroemer, J.Peters: Interaction primitives for human-robot cooperation tasks. ICRA'14 (2014)
- [Kober 12] J.Kober, M.Glisson, M.Mistry: Playing catch and juggling with a humanoid robot. IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (2012)
- [Whitsell 15] B.Whitsell, P.Artemiadis: On the role duality and switching in human-robot cooperation: an adaptive approach. ICRA'15 (2015)
- [Yamazaki 10] K.Yamazaki, R.Ueda, S.Nozaawa, Y.Mori, T.Maki, N.Hatao, K.Okada, M.Inaba: System integration of a daily assistive robot and its application to tidying and cleaning rooms. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2010)
- [Yamazaki 14] K.Yamazaki, R.Oya, K.Nagahama, K.Okada, M.Inaba: Bottom dressing by a life-sized humanoid robot provided failure detection and recovery functions. IEEE/SICE International Symposium on System Integration (2014)