

氏 名 Anja Nicole Austermann

学位（専攻分野） 博士（情報学）

学位記番号 総研大甲第 1384 号

学位授与の日付 平成 22 年 9 月 30 日

学位授与の要件 複合科学研究科 情報学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Learning to Understand Multimodal Commands  
and Feedback for Human-Robot Interaction

論文審査委員 主 査 教授 山田 誠二  
教授 佐藤 健  
准教授 Helmut Prendinger  
准教授 稲邑 哲也  
准教授 市瀬 龍太郎

## 論文内容の要旨

Understanding a user's natural interaction is a challenge that needs to be dealt with in order to enable novice users to use robots smoothly and intuitively. While using a set of hard-coded commands to control a robot is usually rather reliable and easy to implement, it is troublesome for the user, as it requires him/her to learn the correct commands in order to interact with the robot. Then again unrestricted natural language understanding is considered one of the "holy grails" in human-computer interaction, but is still an unsolved problem.

This dissertation proposes a method to enable a robot to adapt to its user's natural way of giving commands and feedback through natural interaction in special virtual training tasks. The user teaches the robot to understand his/her individual way of expressing approval, disapproval and a limited number of commands using speech, prosody and touch.

In order to enable the robot to pro-actively explore how the user gives commands and provoke approving and disapproving reactions, the system uses special training tasks. During the training, the robot cannot actually understand its user. In order to enable the robot to react appropriately anyway, the training tasks are designed in such a way that the robot can anticipate the user's commands and feedback - e.g. by using games which allow the user to judge easily whether a move of the robot was good or bad and give appropriate feedback, so that the robot can accurately guess whether to expect positive or negative feedback and even provoke the feedback it wants to learn by deliberately making good or bad moves.

In this work, "virtual" training tasks are used to avoid time-consuming walking motion and to enable the robot to access all properties of the task instantly. The task-scene is shown on a screen and the robot visualizes its actions by motion, sounds and its LEDs. A first experiment for learning positive and negative feedback uses easy games, like "Connect Four" and "Pairs" in which the robot could explore the user's feedback behavior by making good or bad moves. In a follow-up study, which was have conducted with the humanoid robot ASIMO and with AIBO, a dog-shaped pet robot, this work has been extended for learning simple commands. The experiments used a "virtual living room", a simplified living room scene, in which the user can ask the robot to fulfill tasks such as switching on the TV or serving a coffee.

After learning the names of the different objects in the room by pointing at them and asking the user to name them, the robot requests from the task server to show a situation that requires a certain action to be performed by the robot: e.g. the light is switched off so that the room is too dark. The user responds to this situation by giving the appropriate command to the robot: "Hey robot, can you switch the light on?" or "It's too dark here!". By correct/incorrect performance, the robot can provoke positive/negative feedback from the user. One of the benefits of "virtual" training tasks is that the robot can learn commands, that the user cannot teach by demonstration, but which seem to be necessary for a service or

entertainment robot, like showing the battery status, recharging, shutting down, etc.

The robot learns by a two-staged algorithm based on Hidden Markov Models and classical conditioning, which is inspired by associative learning in humans and animals. In the first stage, which corresponds to the stimulus encoding in natural learning, unsupervised training of HMMs is used to model the incoming speech and prosody stimuli. Touch stimuli are represented using a simple duration-based model. Unsupervised training of HMMs allows the system to cluster similar perceptions without depending on explicit transcriptions of what the user has said or done, which are not available when learning through natural interaction.

Utterances and meanings can usually not be mapped one-to-one, because the same meaning can be expressed by multiple utterances, and utterances can have different meanings. This is handled by the associative learning stage. It associates the trained HMMs with meanings and integrates perceptions from different modalities, using an implementation of classical conditioning. The meanings are inferred from the robot's situation. E.g. If the robot just requested the task server to show a dirty spot on the carpet, the robot assumes, the following utterance means clean(carpet), so the system first searches for a match of any of the HMMs, associated with the meaning "carpet". Then, the remainder of the utterance is used to train a HMM sequence to be associated with the meaning "to clean". The positions of the detected parameters are used to insert appropriate placeholders in the recognition grammar.

In a first study, based on game-like tasks, the robot learned to discriminate between positive and negative feedback based on speech, prosody and touch with an average accuracy of 95.97%. The performance in the more complex command learning task is 84.45% for distinguishing eight commands with 16 possible parameters.

## 博士論文の審査結果の要旨

ヒューマンロボットインタラクションにおいて、強化学習などの行動学習アルゴリズムを応用した学習ロボットが研究開発されているが、そこでは人間の教師からロボットへ報酬が与えられることが前提となっている。そして実際には、そのような人間からの報酬は、ロボットへの音声発話、接触、ジェスチャなどの様々なモダリティを利用して、種々の信号により与えられる。ところが、これらのマルチモーダルな報酬を認識する学習は、非常に重要であるにも関わらず、これまでほとんど研究されていない。このような背景から、本論文は、ヒューマンロボットインタラクションにおいて、人間から与えられるマルチモーダルなフィードバック（報酬）を認識する学習の枠組みの提案と評価実験を行い、さらにシンプルなコマンドの認識の学習まで拡張を行ったものである。

本論文は、隠れマルコフモデルと古典的条件付けを用いて、人間からのフィードバックをロボットが認識する学習の枠組みを提案し、それをコマンドの学習に拡張、そしてシステム実装、評価実験を行った内容であり、全7章から構成される。

第1章 Introduction では、本論文が対象とする問題の背景とアプローチ、システム構成が示される。

第2章 Multimodal perception and learning in humans and robots では、マルチモーダルな報酬の学習およびコマンド学習に関連する先行研究について説明している。幼児の言語獲得、刺激エンコーディングと関連学習を中心にサーベイされている。

第3章 Characteristics of users' feedback and commands in human-robot interaction では、ヒューマンロボットインタラクションにおいて、人間の教師がロボットに与える報酬とコマンドの特徴パターンを実験により分析している。仮想空間上のタスクを用意し、ペットロボットとヒューマノイドロボット、ユーザフィードバックのモダリティ、固定されたフィードバックと柔軟なフィードバックについて比較実験を行い、それぞれの特徴をまとめている。

第4章 Learning to understand multimodal user feedback では、隠れマルコフモデル HMM で実現される刺激エンコーディングと、古典的条件付けで実装される関連学習の2つのフェイズからなる、マルチモーダルユーザフィードバックの認識学習の枠組みを提案している。発話、韻律、接触のマルチモダリティで入力される報酬の信号は、まず HMM で認識されて刺激エンコーディングが実現される。次に、同時に認識された信号が古典的条件付けにより関連付けられることで、ユーザフィードバックが学習される。ペットロボットと人間のインタラクションにおいて実験的評価を行い、先の3つのモダリティを統合することで、95%を超える高精度での認識が可能になっている。

第5章 Extension of the algorithm for learning to understand parameterized commands では、第4章で開発した学習アルゴリズムを拡張し、コマンド学習に適用している。入力は音声による命令文の発話であり、最初に対象物を認識する学習を行い、次にコマンド全体の学習を行う。最後に、実験的評価を行うことで、高精度でのコマンド学習が可能であることを示している。

第6章 Implementation of the framework では、本論文における実験で用いられたシステム実装について説明している。実験システムは、タスクサーバ、知覚サーバ、ロボッ

トコントローラ，そしてロボットから構成されることが述べられ，学習アルゴリズムの実装に利用されたツールキットが説明されている。

第7章 Conclusion and outlook では，論文全体を総括し，結論を述べている。

本論文は，ヒューマンロボットインタラクションにおいて，マルチモーダルなユーザフィードバックの認識学習という新しい枠組みを提案し，その実現方法を開発したものであり，その有効性も実験的に明確に示されている。また，本研究の成果は，学术论文1篇，査読付き国際会議での発表8件により公表されている。

以上の点をもって，本論文は，博士（情報学）の学位論文として十分な価値があるものと認められた。