〔特集論文〕「ヒューマンエージェントインタラクション (HAI)」

教育支援ロボットの賢さの違いが 子どもの英単語学習に及ぼす影響

The Difference of Excellence in Educational-support Robots Affects Children's Learning English Vocabularies

松添 静子
Shizuko Matsuzoe

筑波大学大学院 システム情報工学研究科
Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba
s1130184@u.tsukuba.ac.jp

田中 文英
Fumihide Tanaka

筑波大学 システム情報系
Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba
fumihide.tanaka@gmail.com

keywords: human-robot interaction, robotics for children, education support, learning by teaching, care-receiving robot

Summary

In case of educational support using a partner robot, its individual robot character is considered to play an important role. Based on this consideration, we focus on the excellence property of the robot, assuming that the difference of robot excellence affects the performance of a human learner who joins a learning activity together with the robot. In this paper, we report on a field experiment that was conducted at an English learning school for Japanese children (4–8 years of age). We divided 19 participants into three experimental conditions in which we introduced a small humanoid robot with three different excellence levels one for each condition: Condition A robot was designed to be with the highest excellence level. The robot could answer to any question given by a human teacher correctly. In contrast, Condition B robot could not answer correctly at the beginning but could learn from partner humans who could take the robot by the hand and teach it step by step. Finally, Condition C robot was designed to be with the lowest excellence level. Condition C robot could neither answer to any question from beginning nor learn from partner humans. Experimental results showed that the learning performance of participants who joined a drawing-game lesson for English names of various shapes together with Condition A or Condition B robot was more increased than the case with Condition C robot. In addition, Condition B and Condition C robots were found to be more effective in motivating participants in the learning activity. Those findings would be valuable for a better future design of a partner robot whose goal is to enrich and support educational activities in classrooms.

1. ま え が き

近年、様々な情報通信技術 (ICT: Information and Communication Technology) が教育環境に導入され始めている。その中でもエージェント技術と関連するものとしては、教育支援用の仮想エージェント [Brophy 99, Biswas 05, Lee 07] や人間型ロボット [Kanda 04, Han 05, You 06, Kanda 07] 等の導入事例があり、それぞれの有用性について報告がなされている。語学教育の場面では、古くから言葉と身体動作を関連づけることが言語の習得に有効であるということが知られており [Palmer 25]、全身反応教授法 [Asher 69] のように物理世界における学習者と他者の身体動作を通じたやりとりを取り入れた指導法はこれまで広く現場で実践されてきている。そして、学習者に対して他者を表現可能なエージェント技術、さらには物理世界で多様な身体動作に基づくやりとりを提供可

能なロボット技術は、こうした場面の支援に有効なメディアであると考えられる。

教育支援ロボットの研究に関しては、これまで人間の教師の役割を想定した教師型ロボットの試みが多くなされてきた。神田らは、人間型ロボット Robovie を小学校に長期間導入し、子どもたちの英語学習に与える効果やロボットへの興味の変化について調査している [Kanda 04]。Han らは、子どもたちの英語学習に対する集中度や達成度について、ロボットを利用した学習支援手法 (r-Learning) と既存の e-Learning や本・オーディオテープを用いた手法との間で比較調査し、ロボットの利用が効果的であると報告している [Han 05, Han 08]。You らは、教師のアシスタントとしてのデモンストレーションロボットを小学校へ導入した例を報告しており、実施後のアンケート調査から、ロボットを導入した授業に対して比較的良好な評価が得られたとしている [You 06]。Saerbeck ら

はロボットの social supportive behavior の有無が子どもたちの学習の効率化にどのように影響するのか調査し、この枠組みを適用したロボットがテストの成績や学習意欲の向上において効果的であると報告している [Saerbeck 10]。これら一連の教育支援ロボットは、人間の教師のように、ある意味で子どもたちよりも上位の立場を担っている存在であるといえる。

その一方で、子どもたちとより対等な立場のロボットを用いた教育支援の研究も行われ始めている。教師型ロボットの場合、子どもたち側からロボットに対して質問することはできるが、ロボット側から問題を出題したり何かを教えたりというように、大抵のインタラクションは得てしてロボット側からの一方的なものになりがちである。これに対して、子どもたちと対等な立場のロボットでは、子どもたちはロボットに対して何かを質問するだけでなく、そのロボットに対して教えることも可能となりインタラクションの幅が大きく広がる。関連して、教育学分野では Learning by Teaching (他者への教示による学習) という概念があり [Martin]、一部では teachable agent と呼ばれる教育支援用のコンピュータエージェントへも応用されている [Brophy 99, Biswas 05]。また、田中らは意図的に間違った行動をするよう設計されたケア・レシーバー型ロボット (CRR: Care-Receiving Robot) を導入することによって、子どもたちからロボットへの自然な教示行動を誘発させ、結果的に子どもたち自身への教育効果向上に繋げることを目的とした研究を行っている [Tanaka 09, Tanaka 10]。そして子ども英会話教室におけるフィールド実験において、CRR を導入した場合と導入しなかった場合 (人間教師とのやり取りのみ) の間での学習効果の違いについて調査している。その結果、同ロボットが 3~6 歳の子どもたちの未知英語動詞学習を有意に促進し得ることが確認されている [Tanaka 12]。これらの研究から、子どもと対等な立場のロボットは子どもたちの自発的・能動的な学習参加を促す効果が高いことが判明しつつある。また、教師型ロボットと比較して、ロボット倫理 [Sharkey 08] 上の問題が少ないことも主張されている。

子どもたちと対等な立場のロボットの中でも、様々な種類のロボットを考えることができる。その中でも本研究では、以下に述べる『ロボットの賢さ』というポイントに着目する。実際、子どもたち同士の中でも優等生タイプや怠け者タイプなど様々な特性を有した仲間たちが居るように、ここではロボットについても幾つかの異なる特性を設計することを考えてみる。具体的には、教師の提示する如何なる質問にも正答する優等生タイプのロボット、最初は正答できないが子どもたちからの教示を受けて学習することで正答できる賢さを有したロボット、何度教えても学習できず誤答し続けるロボット、といった賢さの度合いが異なる 3 種類のロボットを考える。こうした特性の違いは子どもたちとの間に起き得るインタ

ラクションの質や量にもかなりの違いを及ぼすことが想定され、教育支援ロボットとしての導入効果にも大きく関わるものと予想される。実際、Kanda らの研究 [Kanda 07] においても、ロボットの行動パターンを変化させていくことによって、対話ベースのインタラクションを通して子どもたちの興味・関心を引きつけることに成功している。しかしながら、これまでこうした要因 (ロボットの賢さの違い) が具体的に子どもたちの学習にどのような影響を与えるかについては調査されていなかった。そこで本研究では、子ども英会話教室における図形のお絵かきゲームを題材としたフィールド実験により、ロボットの賢さの違いが周囲の子どもたちの学習に及ぼす影響について調査することを目指す。

本論文の構成は以下の通りである。次の 2 章では、本研究におけるロボットの賢さの定義について説明する。続いて 3 章と 4 章では、子ども英会話教室におけるフィールド実験と結果について述べる。次いで 5 章にて得られた実験結果を考察し、6 章にて本論文を締めくくる。

2. 本研究におけるロボットの賢さの定義

本研究では、子どもたちと共に学習の場面に参加するロボットの賢さパラメータを以下の三通りに定義する。

賢さ：高 (Condition A) 教師や子どもたちから提示される全ての質問に正答する優等生タイプのロボットが相当する。図 1 は教室で行われる果物の名前当てゲームの例であるが、Condition A のロボットは子どもからの問い合わせに対しても全て最初から正答する (図 1(a))。ロボットを学習者とみなす場合、Condition A のロボットの学習に要する被教示回数は 0 回である。

賢さ：中 (Condition B) このロボットは、授業開始時には全ての質問に対して正答することができない。ただし学習能力を有しており、子どもたちから一度教示を受けると次回からはその質問に正答することができるようになる (図 1(b))。子どもたちにとっては教えがいのあるロボットであり、Condition B のロボットの学習に要する被教示回数は 1 回である。

賢さ：低 (Condition C) Condition B のロボットと同様に、このロボットも授業開始時から全ての質問に対して正答することができない。さらに Condition B と異なり Condition C のロボットには学習能力が無く、子どもたちが何回教示を与えても質問に対して誤答を繰り返す (図 1(c))。子どもたちにとっては Condition A とは異った意味で教えがいのないロボットであり、Condition C のロボットの学習に要する被教示回数は 回 (学習不能) である。

図 2 実験を実施した子ども英会話教室 (室内面積: 約 $25m^2$)

3. 子ども英会話教室におけるフィールド実験

3.1 実験目的

本実験では、子ども英会話教室における図形のお絵かきゲームを題材として、2 章で定義したロボットの賢さの違いが、教室で共に学ぶ子どもの英単語学習にどのような影響を及ぼすのかについて調べることを目的とした。

教育支援ロボットには、子どもたちへの学習促進効果が高いことや、子どもたちの学習に関連した興味を引き出せることが求められている。そこで本実験では、大別して以下の二つの観点から検証を行った。

- (1) 実験開始前には知らなかった図形英語名称について、実験終了後の事後テストではどの程度正解することができたか (学習促進効果の検証)
- (2) レッスン終了後に子どもとロボットが自由に関わり合う中で、どの程度その日のレッスン内容と関連するインタラクションが自発的に発生していたか (学習に関連した興味の誘引)

3.2 実験方法

§ 1 実験タスク

図形名称を表す英単語を学習対象とした、図形のお絵かきゲームを用いた (詳細な手順については 3.2.5 節参照)。早期教育においては、子どもたちが楽しみながら学習を行えることが重要であり、実際の子ども英会話教室においてもお絵かきゲームのような hands-on practice 型の (手を動かして参加できる) 活動が用いられることが多く、本実験においても採用することにした。

§ 2 実験フィールド・参加者

実験は、つくば市の大型ショッピングモール内にある (株) こども英会話のミネルヴァ・イースつくばプラザ教室にて実施した。実験を行った教室の様子を図 2 に示す。実験は子どもたちがリラックスできるよう極力通常レッスンの雰囲気を保つ形で行われた。

実験参加者は同教室に通う 4~8 歳、合計 19 名の子どもたち (男児: 8 名, 女児: 11 名, 平均年齢: 5.8 歳) であり、筑波大学研究倫理委員会における実験計画の承認を経て、実験参加者の保護者への事前説明と書面同意を得た後に行われた。

実験には 2 名の実験者 (実験を熟知した大学院生および大学生) が参加した。実験者 1 は、教師役としてお絵かきゲームに介在し、実験中の安全監督者としての役割も同時に担った。実験者 1 については全ての実験セッションに共通して同一の大学院生が担当した。実験者 2 は、別室にてロボットの遠隔操作を担当した。

§ 3 実験準備

ロボット機体は、Aldebaran Robotics 社製の NAO を用いた (図 3 (左))。実験は Wizard-of-Oz 法の枠組で行われ、ロボットの行動は別室の実験者 2 により遠隔操作された。予め用意された一連の動作や発話行動に加え

図3 (左) 実験で用いたロボットとお絵かきゲームに用いた道具一式 (右) ホワイトボード、マーカー、イレイサー

図4 直接教示の様子：子どもがロボットの手を取り直接動かすことで“square”の描き方を教示している。

て、実験参加者がロボットに手取り足取り動作を教示（以後、直接教示と呼ぶ）した場合、この間の各関節角の動きを記録して、後にその動作を正確に再現する機能が用意された。図4にこの直接教示が行われている場面の例を示す。

遠隔操作においてはモニタリング環境が重要であるため、ハイビジョンのビデオ会議システム（LifeSize）を導入し、教室内の対角俯瞰位置にカメラを2台、卓上にズームカメラを1台設置し、マイクロフォンは床上に設置した。これらとは別に、2台のカムコーダーで実験の様子が録画され、分析に用いられた。

お絵かきゲームで使用した道具を図3に示す。図3（右）に示すホワイトボード類一式については市販品を用いた。安定した描画を可能にするためにホワイトボードは台に固定された。また、図5に示すような2セットのカードが用いられた。これらはそれぞれ同一の図形を表すものであるが、遠隔操作時のモニター上での認識しやすさを踏まえて、図5（左）のようなカードも用いられた。

§4 実験のデザイン

本実験では、以下に示す3条件から成る参加者間配置デザイン（between participants design）が採用された。

Condition A：優等生ロボット 教師や実験参加者から特定の図形の描画を要求された場合、全て最初から正しく描くことができる。

Condition B：学習能力のあるロボット 実験開始時には如何なる図形も描くことができないが、直接教示により特定の図形の描き方を一度でも教わると、次からはその図形を描くことができるようになる。

図5 (左) 図形の形をしたカード、(右) 図形が描かれている長方形のカード。いずれも写真左上より circle, triangle, square, pentagon, cross, oval, heart, sector, crescent, star を表す。

図6 各 Condition におけるロボットと実験参加者の行動系列：実験参加者は、ロボットが正解図形を描いている場合はその行動の観察のみを行い、間違った図形を描いた場合のみロボットに対して直接教示を行った。

Condition C：誤答し続けるロボット 実験を通して終始、要求された図形を正しく描くことができない。

図6に、実験中のロボットと参加者の行動系列を示す。各条件の統制として、お絵かきゲーム中におけるロボットの描画実演回数を1単語あたり4回と固定した。各実験参加者はこの中のいずれかが1条件のみの実験に参加できるものとし、年齢や性別、過去にロボットと遊んだ経験の有無などの要因を考慮して、極力偏りが無いよう配置された。

§5 実験手順

図7に全体の実験の流れ（全体で40～50分程度）を示す。以下、各段階の内容について順を追って説明する。

【初めの挨拶】

1名の実験参加者が実験者1と共に入室する。実験者2はその様子を確認しながら遠隔操作を開始する。ロボットは「Hello, I am Nao.」「Nice to meet you.」といった発話をし、お互いに挨拶をする。

図 7 実験の流れ：括弧内には各段階での所要時間の目安を示す．全体の所要時間としては 40～50 分程度であった．

図 8 (左) お絵かきゲームの様子 (右) 自由時間の様子．

【お絵かきゲーム】

お絵かきゲーム (図 8 (左)) は二週の流れで構成された．この流れの概要を図 9 に示す．

本実験では、実験参加者が予め知らなかった英語図形名称をゲーム終了後にどの程度覚えられたかを調査することによって学習促進効果を測る．そのため、一周目では実験参加者の未知図形英単語 (英語名称を知らない図形) の同定を目的とする．この手順を以下に示す．なお、実験時間内に子どもたちが学習可能な未知英単語数の限界を考慮し、同定する単語数は 3 つとした．

- (1) 実験者 1 が実験参加者に対して「Can you draw a < 図形の英語名称 >?」と質問する．
- (2) 実験参加者が正しく描けた場合は (1) に戻る．実験参加者がホワイトボード上に誤った図形を描いたり正解が不明だったりした場合、以降ゲームでの学習対象としてこの図形を採用し、次の手順へ進む．
- (3) 実験者 1 がロボットに対して (1) と同様の質問をする．
- (4) ロボットは設定された条件に応じた行動をとる．Condition A の場合、ロボットはまず「Yes」と応答し、続いて正解の図形をホワイトボード上に描き、(6) へ進む．Condition B もしくは Condition C の場合、やはり「Yes」と応答するが、質問の図形とは全く無関係な図形を描画し、(5) へ進む．この際、実験者 1 は実験参加者にロボットが誤った図形を描画したことを伝える．
- (5) 間違いを指摘されたロボットは「Teach me!」と発話し、実験者 1 は実験参加者にロボットへ該当図形の正しい描き方を教えるよう促す．
- (6) 実験者 1 がロボットに対して再度同じ図形を描くように促す．続いて Condition A もしくは Condition B の場合は、「OK」と応答した後に正解の図形を描く．Condition C の場合は、「OK」と応答しながらも

図 9 二周からなるお絵かきゲームの流れ：一周目は、実験参加者が英語名を知らない図形の同定を目的とした．二周目は、一周目で同定した図形を用いて同様のやり取りが繰り返された．

やはり無関係な図形を描画する．この際も (4) と同様に、実験者 1 は実験参加者にロボットが誤った図形を描画したことを伝える．

- (7) 実験参加者が正解できなかった図形が 3 つ同定できていない場合は (1) へ戻る．同定できていたら二周目へ進む．

二周目は、一周目で同定した図形を用いたやり取りを、同様の手順で再度繰り返す．ここでは、実験者 1 は自らの質問に対する実験参加者の正誤とは無関係にロボットへの質問に進んだ．

【自由時間】

お絵かきゲーム終了後、実験参加者にロボットと自由に遊んでもらうために 10 分間の自由時間を設けた．図 8 (右) に自由時間の様子を示す．実験者 1 は図 5 (左) に示すカードのうち、お絵かきゲームで使用しなかった図形の中からランダムに 6 枚を選択し、そのうち 3 枚をロボットの周りに並べ、残りを実験参加者に手渡した．その上で実験参加者にロボットと自由に遊ぶよう伝え、自身は本を読むなどして無関心を振る舞いながら安全監督者として室内に滞在した．自由時間におけるロボットの行動は、お絵かきゲーム時の条件を継続した．

【事後テスト】

最後に、本レッスンを通してどの程度図形の英単語を覚えることができたかについて調査するために、お絵かきゲームで使用した 3 つの図形を対象とした質問形式の事後テストを実施した．実験参加者の年齢帯に幅があるため、以下の二段階の質問を準備した．

まずは「Can you draw a < 図形の英単語 >?」と実験中と同様の質問 (質問 1) を行い、事前に用意しておいた解答用紙に図形を記入してもらった．描画図形の正誤判断は実験に介在していない 10 名の大学生・大学院生によって行われた．各人にはすべての実験参加者の答案

図 10 事後テストの平均正答率：質問 1 における Condition A と C の間に 5% 有意水準の有意差 ($Z(13) = -2.051, p < 0.05$)，Condition B と C の間に有意傾向 ($Z(12) = -1.712, p = 0.08$) が認められた。

を採点してもらい、その平均得点を各実験参加者の質問 1 の成績（正答率）とした。続いて実験者 1 は図 5（右）のカードを正解が含まれた状態でランダムに選択し、実験参加者の目前に並べた上で「Can you pick up a <図形の英単語>?」という質問（質問 2）を行い、正しいカードを当てられるか調べた。質問 2 は、図形を正しく描くことはできないが、その図形の英語名称は答えることができる、というケースのために用意した。

【別れの挨拶】

最後に、実験参加者はロボットと挨拶を交わし、実験者 1 と共に教室を退室した時点で実験終了とした。

4. 実験結果

4.1 事後テストの結果

図 10 に質問 1、質問 2 に対する実験参加者の平均正答率を示す。全般に、Condition A および Condition B における平均正答率は Condition C よりも高い傾向にあり、統計検定（Wilcoxon の順位和検定）の結果としては、質問 1 における Condition A と Condition C の平均正答率の間に 5% 有意水準の有意差 ($Z(13) = -2.051, p < 0.05$)，同じく Condition B と Condition C の間に有意傾向 ($Z(12) = -1.712, p = 0.08$) が認められた。

この結果からは Condition A と Condition B の間に差は無いように思われたが、質問 2 において、質問直後から回答までに要する時間（実験参加者が正解と思うカードに触れるまでの所要時間）を分析してみたところ、図 11 に示すように、Condition B における回答時間が Condition A と比較して有意に短いことが判明した ($Z(39) = -1.747, p < 0.05$)。質問 1 については描画行動の習熟に個人差が大きく、平均時間で有意差を確認することはできなかった。

図 11 質問 2 における平均回答所要時間：Condition A と B の間に 5% 有意水準の有意差 ($Z(39) = -1.747, p < 0.05$)，Condition A と C の間に有意傾向 ($Z(39) = -1.352, p = 0.09$) が認められた。

4.2 実験参加者とロボットのインタラクション分析

次に、実験時に撮影されたビデオデータを用いて、実験参加者の行動分析を行った。3.1 節で記したように、ロボット導入時のインタラクション内容に関する調査は重要な意味を持つ。そこで、具体的にはレッスンに関連するインタラクションがどの程度発生していたのかについて、ゲーム終了後の自由時間に着目して分析した。

分析ではまず、レッスンに関連するインタラクションをビデオコーディングにより抽出した。コーディング規範はお絵かきゲームと関連する実験参加者のロボットへの行動と定義され、具体的には、実験参加者がロボットに図形の描き方を教えたり、ロボットが描いた図形の正誤についてコメントしたりするといった行動、ロボットに図形を描かせるために図形カードを見せる行動などが含まれた。また、ここでのインタラクションは双方向なものだけでなく、ロボットからの反応を得られなかった実験参加者からの一方的なものも含み、言語的なものと非言語的なものの両方を対象としている。なお、言語的インタラクションと非言語的インタラクションが同時に発生していた場合（例：「OK。」と言いながら首を縦に振る）は、各インタラクションを独立に考え、重複して計数することとした。ビデオコーディングは行動分析の汎用ソフトウェアである ELAN を用いて本論文の第一著者によって行われた。同時に、ビデオコーディングの信頼性を確認するために外部から 2 名の大学生にも分析を行ってもらい一致度を確認した ($\kappa = 0.85$)。続いて、ビデオコーディングの結果を用いてレッスンに関連するインタラクションとそれ以外のインタラクションの発生回数や割合を算出し、条件間で比較を行った。

図 12 にインタラクションの平均発生回数の結果を示す。ここで重要な意味を持つ、レッスンと関係のあるインタラクションについては、Condition B において最も回数

図 12 自由時間におけるインタラクション発生回数 (平均値) の比較: Lesson-relevant はレッスンと関係のあるインタラクション, Others はそれ以外を示す. 各条件間に有意差は認められなかった. 条件内にて Lesson-relevant と Others の平均値を比較した結果, Condition B と Condition C において有意差が認められた (Condition B: $Z(6) = -2.207, p < 0.05$, Condition C: $Z(6) = -2.201, p < 0.05$).

が多く発生していた. ただしデータの分散が比較的大きく, 各条件間で統計的有意差を認めるには至らなかった.

続いて図 13 にレッスンと関連したインタラクションの発生割合の比較結果を示す. 各条件間の比率の差について χ^2 検定を行った結果, それぞれ Condition A-B 間 ($\chi^2(1) = 16.392, p < 0.001$) と Condition A-C 間 ($\chi^2(1) = 10.889, p < 0.001$) で有意差が認められ, 実験参加者がロボットに対して教示する機会がある条件 (Condition B・C) において, レッスンに関連するインタラクションが高い割合で発生していたことが判明した.

5. 考 察

5.1 学習促進効果の検証について

4.1 節に記したように, 事後テストの結果 (図 10) からは, 全ての該当条件間では統計的有意差は認められなかったものの, Condition A (優等生ロボット) や Condition B (学習能力のあるロボット) の平均正答率が Condition C (誤答し続けるロボット) と比べて高い傾向にあることが判明した. その一方で, 平均回答所要時間の観点 (図 11) では, Condition B・C における所要時間が Condition A よりも短い傾向にあることが分かった. 実際, Condition B・C における回答時には, 実験参加者はより自信をもって (即座に) 回答する傾向が見受けられた.

この結果は次のように解釈することができると思われる. まず, Condition A・B における共通点の中で Condition C に存在しない要素は, ロボットによる正答提示である. 従って, ロボットによる正答提示の機会が, 実験参加者の英単語学習に繋がった可能性がある. 次に, Condition B・C における共通点の中で Condition A に存

図 13 自由時間における, レッスンと関連したインタラクションの発生割合の比較 (Condition A-B 間: $\chi^2(1) = 16.392, p < 0.001$, Condition A-C 間: $\chi^2(1) = 10.889, p < 0.001$): Lesson-relevant はレッスンと関係のあるインタラクション, Others はそれ以外を示す.

在しない要素は, ロボットの誤答 (実験参加者からの直接教示の機会) である. 従って, 実験参加者にロボットへの直接教示の機会を与えることは, 実験参加者にその問題の回答に際して自信を持たせることに繋がった可能性がある. ただし, Condition C のロボットは全く正答を提示しないため, 教示した図形と該当する英単語を一致させることに寄与できず, Condition C の平均正答率の低下に繋がった可能性がある. 以上をまとめると, 子どもたちに図形名称の英単語を効果的に学習してもらうためにはロボットからの正答提示が有効であり, また, 回答に際して自信を持たせるためには直接教示の機会を与えることが有効である可能性が示唆された.

5.2 学習に関連した興味の誘引について

4.2 節にて述べたインタラクション分析の結果から, Condition B・C においてレッスンに関連するインタラクションが高い割合で発生していたことが分かった. この結果は, 実験参加者にロボットへの直接教示の機会を与えることによって, より強く学習内容への興味を誘引していた可能性を示している.

学習に関連した興味の誘引, とくに持続性という観点についてさらに考察を深めるために, 次に述べる追加分析を実施した. ここでは, レッスンに関連するインタラクションとそれ以外のインタラクションの発生頻度の時間遷移を観察してみることにした. Condition ごとに実験参加者の時間遷移データを平均し, 得られた遷移の様子を図 14 に示す. グラフから見て取れるように, Condition A ではレッスンに関連したインタラクションの割合はやはり全般に低い傾向にあり, それ以外のインタラクションとの発生頻度の差は比較的小さいものとなっている. 実際,

(a) Condition A (実験参加者 7 名の平均) (b) Condition B (実験参加者 6 名の平均) (c) Condition C (実験参加者 6 名の平均)

図 14 自由時間におけるインタラクション頻度の時間遷移：縦軸は単位時間（20 秒）あたりにインタラクションが発生していた時間の割合、横軸は経過時間（秒）。Lesson-relevant はレッスンと関係のあるインタラクション、Others はそれ以外を示す。なお、各グラフの近似曲線（3 次多項式）を黒線にて表示している。

図 15 実験参加者のロボットへの自発的教示行動の割合 ($\chi^2(1) = 4.041, p < 0.05$): 自発的行動はロボットからの依頼なしに発生した教示、Others はそれ以外の教示を示す。

Condition A については、一通り図形を使ってロボットと遊び終わると、飽きてしまったように見受けられた実験参加者も複数確認された。これに対して Condition B では、レッスンに関連したインタラクションの発生頻度が前半から高く、減衰傾向も Condition C と比較して小さい。Condition C については中～後半に発生頻度が上昇し、最後急速に減衰する傾向が見られた。実際、Condition C については何回教示してもロボットが一向に描き方を習得しないため、自由時間の後半ではがっかりしてしまう実験参加者も見受けられた。

また、実験参加者からロボットへの教示行動、特にロボットからの依頼（「Teach me!」という呼びかけ）を待たずして実験参加者が自発的に教示を行った回数を調査したところ、Condition B において Condition C よりも有意に高い割合で自発的教示行動が発生していたことが判明した（図 15）。なお、Condition A についてはロボットからの教示依頼が行われていないため分析対象からは

除外している。4.2 節の結果では Condition B・C において共にレッスンに関連するインタラクションが高い割合で発生していたことが示されたが、その中でも自発的な教示行動の誘引という観点に絞ってみると、Condition B のほうがより効果的であった可能性が示唆された。

5.3 本実験における制約

本実験は、条件の厳密な制御が時として困難な現実フィールドで行われたものであり、様々な制約が存在する。

まず、今回の実験参加者は 4 歳～8 歳にわたる幅広い年齢帯の子どもたちを対象にしており、各条件間で偏りの生じないように最大限努力した参加者間配置を行ったものの、結果は全般に分散値が比較的大きなものとなっている。今回の実験では、実施フィールド上の制約から、実験参加者の母集団が予め最大 20 名程度と予想されていたため、年齢帯にまで条件を分割した実験を設計することは困難であった。実験内容やタスク自体については、この年齢帯すべての参加者に行えるものが選ばれており、年齢に応じた極端な得手不得手は見られなかった。ただし、各年齢に応じた具体的で詳細な知見については、本実験のデザインからは定量的に議論することが難しいものとなっている。

また、本実験では、実験の計画段階において、実際に子どもたちがゲーム中のどの場面で学習していくか（学習機会）を完全に予測することが困難であったため、全ての要因を統制できていなかった可能性がある。具体的には、ロボットからの正答提示による学習促進効果（Condition A にて Condition B と同等の高い平均正答率が得られた）が想定できていなかったため、本実験ではロボットの正答提示を含めた学習機会回数を制御できていなかった。ロボットへの直接教示に加えて、ロボットによる正答提示も実験参加者が学習し得る機会であるとみなした場合、Condition A・B では一つの図形あたり 4 回の学習機会が

あった．これに対して Condition C では 2 回しか学習機会が無かったことになり，この点において Condition C は不利であった可能性がある．

最後に，今回は各実験参加者が実験へ参加できる回数を 1 回と定めていたため，長期的な導入効果については不明であることも挙げておく．

6. む す び

本論文では，子どもたちと対等な立場のロボットを用いた教育支援の中で，ロボットの賢さの違いが子どもたちの学習に及ぼす影響について調査した．賢さの違うロボットの具体例として，優等生ロボット，学習能力のあるロボット，誤答し続けるロボットの 3 種類に着目し，子ども英会話教室において図形のお絵かきゲームを用いたフィールド実験を行った．

実験から，図形名称の英単語の学習にはロボットによる正答提示が有効であること，そして子どもたちの学習への興味や自発性を誘引し，自らの回答にも自信を持たせるためにはロボットへの直接教示が有効であることが判明した．この結果は，子どもたちと対等な立場のロボットを用いた教育支援においては，正答提示と直接教示の双方による利点をバランス良く含んだロボットおよびインタラクションの設計，すなわち適度なロボットの賢さが重要であることを示唆している．

謝 辞

本研究は，科研費（23680020），JST 戦略的創造研究推進事業さきがけ，および文部科学省グローバル COE プログラム「サイバニクス：人・機械・情報系の融合複合」の支援を受けて行われた．実験に御協力頂いた株式会社こども英会話のミネルヴァ，実験参加者および保護者の方々，サポートスタッフの方々に深く感謝する．

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Asher 69] Asher, J. J.: The Total Physical Response Approach to Second Language Learning, *The Modern Language Journal*, Vol. 53, No. 1, pp. 3–17 (1969)
- [Biswas 05] Biswas, G., Leelawong, K., Schwartz, D., Vye, N., and Vanderbilt, at T. T. A. G.: Learning by Teaching: A New Agent Paradigm for Educational Software, *Applied Artificial Intelligence: An International Journal*, Vol. 19, No. 3–4, pp. 363–392 (2005)
- [Brophy 99] Brophy, S., Biswas, G., Katzlberger, T., Bransford, J., and Schwartz, D.: Teachable Agents: Combining Insights from Learning Theory and Computer Science, in *In S. P. Lajoie and M. Vivet (Eds.), Artificial Intelligence in Education*, pp. 21–28 (1999)
- [Han 05] Han, J., Jo, M., Park, S., and Kim, S.: The Educational Use of Home Robots for Children, in *Proc. of the 2005 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2005)*, pp. 378–385 (2005)
- [Han 08] Han, J., Jo, M., Jones, V., and Jo, J. H.: Comparative Study on the Educational Use of Home Robots for Children, *Journal of Information Processing Systems*, Vol. 4, No. 4, pp. 159–168 (2008)
- [Kanda 04] Kanda, T., Hirano, T., Eaton, D., and Ishiguro, H.: Interactive Robots as Social Partners and Peer Tutors for Children: a

Field Trial, *Human-Computer Interaction*, Vol. 19, No. 1, pp. 61–84 (2004)

- [Kanda 07] Kanda, T., Sato, R., Saiwaki, N., and Ishiguro, H.: A Two-Month Field Trial in an Elementary School for Long-Term Human-Robot Interaction, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 23, No. 5, pp. 962–971 (2007)
- [Lee 07] Lee, J.-E. R., Nass, C., Brave, S. B., Morishima, Y., Nakajima, H., and Yamada, R.: The Case for Caring Colearners: The Effects of a Computer-mediated Colearner Agent on Trust and Learning, *Journal of Communication*, Vol. 57, No. 2, pp. 183–204 (2007)
- [Martin] Martin, J.: Lernen durch Lehren (LdL): <http://www.ldl.de/>
- [Palmer 25] Palmer, H. E. and Parmer, D.: *English Through Actions*, Kaitakusha (1925)
- [Saerbeck 10] Saerbeck, M., Schut, T., Bartneck, C., and Janse, M. D.: Expressive Robots in Education: Varying the Degree of Social Supportive Behavior of a Robotic Tutor, in *Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems (CHI 2010)*, pp. 1613–1622 (2010)
- [Sharkey 08] Sharkey, N. E.: The Ethical Frontiers of Robotics, *Science*, Vol. 322, No. 5909, pp. 1800–1801 (2008)
- [Tanaka 09] Tanaka, F. and Kimura, T.: The Use of Robots in Early Education: a Scenario Based on Ethical Consideration, in *Proc. of the 18th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2009)*, pp. 558–560 (2009)
- [Tanaka 10] Tanaka, F. and Kimura, T.: Care-receiving Robot as a Tool of Teachers in Child Education, *Interaction Studies*, Vol. 11, No. 2, pp. 263–268 (2010)
- [Tanaka 12] Tanaka, F. and Matsuzoe, S.: Children Teach a Care-Receiving Robot to Promote Their Learning: Field Experiments in a Classroom for Vocabulary Learning, *Journal of Human-Robot Interaction*, Vol. 1, No. 1, pp. 78–95 (2012)
- [You 06] You, Z.-J., Shen, C.-Y., Chang, C.-W., Liu, B.-J., and Chen, G.-D.: A Robot as a Teaching Assistant in an English Class, in *Proc. of the 6th IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT 2006)*, pp. 87–91 (2006)

〔担当委員：菊池 英明〕

2012 年 7 月 6 日 受理

著 者 紹 介

松添 静子

2009 年 信州大学 繊維学部卒．2011 年 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 博士前期課程修了．同年 4 月より筑波大学 システム情報工学研究科 博士後期課程に進学し，現在在学中．ヒューマンロボットインタラクションの研究に従事．日本ロボット学会学生会員．

田中 文英 (正会員)

2003 年 東京工業大学 博士課程修了．博士（工学）．ソニー（株）及びソニー・インテリジェンス・ダイナミクス研究所（株），University of California, San Diego を経て，現在，筑波大学 システム情報系 准教授，JST さきがけ研究員を兼務．人間・ロボット間インタラクション，発達学習等の研究に従事．2001 年 人工知能学会全国大会優秀論文賞，2005 年 IEEE 国際会議 RO-MAN Best Paper Award など受賞．