

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22300279

研究課題名(和文) ロボットと拡張現実手法を融合したテーブルトップ協調学習支援環境の構築と評価

研究課題名(英文) A Tabletop Collaboration Learning Environment by Integrating Robots and AR Technologies and Its Evaluations

研究代表者

杉本 雅則 (Sugimoto, Masanori)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90280560

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円、(間接経費) 3,570,000円

研究成果の概要(和文)：提案システムでは、ロボットプログラミングに不慣れな学習者が、プログラミングの詳細な知識を取得することなく簡単に物理世界でのコンテンツ作成を行える。さらに、物理的なロボットによる3次元的表现を可能にするため、従来の2次元的な移動が可能なロボットを拡張し、高さ方向の変位が可能なロボットを新たに開発した。評価実験では、交通シミュレータやテーブルトップとロボットを用いたゲームデザインなどのタスクを通して、提案システムの有用性を評価した、さらに、都市計画問題への応用や3次元ユーザインターフェイスへの展開についての検討を行い、今後の研究課題を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The proposed system allows novice users to conduct robot-programming tasks without mastering complicated programming skills and knowledge and create original contents in the physical world in an easy manner. A new robot is designed and developed so that it can its position in a 3D space. The evaluations of the proposed system show that users can easily create a traffic simulator or design games using robots. Applications to urban planning tasks and 3D user interfaces are investigated.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学教育・教育工学

キーワード：ロボット 拡張現実感 テーブルトップ 協調学習

1. 研究開始当初の背景

本研究で提案するシステムの特徴であるテーブルトップコンピューティングおよびロボットの教育利用という観点から、それぞれの研究背景および動向について述べる。テーブルトップコンピューティングは、タンジブルインターフェイスの考え方との関連も深く、マウスやキーボードを利用する従来の入力手法に比べ直感的な操作を実現できる、複数学習者による協調作業に適しているなどの点で注目を集めている。そのため、“Tangible and Embedded Interaction”や“Interactive Tabletops and Surfaces”と呼ばれる国際会議を始めとし、ヒューマンコンピュータインタラクションの分野での研究が盛んに行われている。そして、テーブルトップコンピューティングが持つ上記の特徴は、コンピュータの利用に不慣れな学習者に対し、学習状況への参加を促進できるということにも繋がる。そのため、比較的低年齢の子どもたち（主に小学生以下）を対象に、国内外で非常に多くの学習支援応用の提案がなされている。例えば、権威ある国際会議 ACM Interaction Design and Children (ACM IDC) では、例年全発表数の約 1/4 がテーブルトップ環境を用いた研究で占められている。

ロボットを学習支援に利用する試みも、近年急速に増加している。ロボットの利用が効果的な理由の 1 つに、その物理的な存在感を通して学習者の注意や興味のレベルを高められる点が挙げられる。したがって、ロボットを各学習者とのインタラクション、あるいは学習者同士のインタラクションを強化するメディアと捉えることができる。学習者とのインタラクションのモダリティをどのようにデザインするかに応じて、人間との自然なコミュニケーション（例えば音声対話）が可能で高性能かつ高価なロボット（ヒューマノイドロボットなど）、あるいは実世界での空間的な移動だけが可能な単機能で安価なロボットを用いたシステムが提案されている。

2. 研究の目的

本研究では、(a) 指による同時多入力（マルチタッチ入力）とロボットトラッキングと可能なテーブルトッププラットフォーム (b) 物理世界と仮想世界を融合した環境問題や交通、物理現象などのシミュレーション教材、および (c) プログラム知識や技術の乏しい学習者のためのロボットプログラミング環境が構築される。物理的なロボット、複数学習者が参加可能なテーブルトッププラットフォーム、ならびに拡張現実手法を用いたインタラクティブで没入感の高い視覚的表現が、学習者の学習や学習意欲向上をどのように支援、強化できるのを明らかにする。また、教育現場と連携した参加型デザイン (participatory design) 手法により、テーブル上での指ジェスチャーだけでロボットの振る舞

いをプログラミングできる環境を構築し、ハードウェア、ソフトウェアの知識が必ずしも十分ではない子どもたちによる「直感的なロボットプログラミング」の可能性を追究する。さらに、提案するテーブルトッププラットフォーム上で学習者が制作する作品を通して、創造性や想像力を支援、強化する効果を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、システム構築および評価を行った。以下ではシステム構築について述べる。

(1) 提案システムの概要

提案システムでは既存のマルチタッチ入力認識手法である DI (Diffused Illumination) と FTIR (Frustrated Total Internal Refraction) を組み合わせることで、テーブル上の指の接触と、ロボットに取り付けたマーカーを同時に認識できる。テーブル上の入力情報は、reactIVision と呼ばれる画像認識ライブラリにより取得される。テーブル上のロボットには Bluetooth モジュールが実装されており、RoboTable2 は Bluetooth を介してそれぞれのロボットに命令を送ることができる。

入力情報を利用して描画を行うために、RMT4j と呼ばれるマルチタッチライブラリに加え、オブジェクトの物理的な衝突を表現するために Java JBox2D を組み込んでいる。さらに、異なる駆動機構や無線通信手法を備えたロボットに対応するために、独自のシステム開発 Toolkit を実装している。

(2) イベント駆動型プログラム

本研究では、プログラムモデルとしてイベント駆動型プログラムを採用する。イベント駆動型プログラムは個々のイベントと、それに対するロボットの振る舞いの組み合わせで構成される。ここでは、この組み合わせをプログラムブロックと呼ぶことにする。プログラムブロックはシステムに登録され、テーブル上の状況と登録されたプログラムブロックとの照合を行い、個々のロボットに送信する命令を切り替える。例えば、「正面の障害物を認識 (イベント)」と「右に 90° 回転して回避 (振る舞い)」からなるプログラムブロックが該当すれば、ロボットに障害物を回避させることが可能になる。本稿では、作成したプログラムブロックの集合をプログラムとして扱う。

(3) プログラミング手法

提案システムを用いることで、テーブル上のロボットに対し以下の直接的な入力を行うことが可能である。

- ① ロボットを直接掴んで動かす (“grasp & move”)
- ② ロボットの周囲に表示されるボタンなどのバーチャルなオブジェクトに触れて入力する (“touch”)

- ③ マルチタッチジェスチャで入力する（“resize & reshape”）
提案するロボットプログラミング手法では、学習者はこれらの入力操作を組み合わせることによりプログラミングを行う。

(4) 提案手法のシステム構成

図1に示すように提案システムはTabletop Event Handler からロボットや指などの位置情報を取得し、RobotDriver 経由でロボットの制御を行う。Tabletop Event Handler からからの入力情報は Event Processor で解析され、認識イベントやボタン入力イベント等の特定を行う。特定されたイベントに応じて、Program Block Generator, Robot Controller に処理が移される。各々の処理について以下に述べる。

① プログラムブロックの生成

Event Processor がロボットの認識イベントを同定すると、Program Block Generator により「認識イベント保存ボタン」が表示される。学習者がこのボタンに触れると、Event Generator が起動され認識イベントとして保存される。次に、学習者はロボットをテーブル上で動かすことで、保存された認識イベントに対応するロボットの振る舞いを入力する。入力された振る舞いは Behavior Recorder によりロボットの駆動機構(回転, 直進など)に応じた命令(振る舞い情報)に変換される。意図通りの動きを入力できたと判断した学習者が「振る舞い情報保存ボタン」に触れると、認識イベントと振る舞い情報が Program Block Assembler に送られる。学習者は、ロボットを動かしながら繰り返し振る舞い情報の入力を行うことができる。そして「振る舞い情報保存ボタン」に触れるたびに、新たな振る舞い情報に更新される。

② プログラムブロックの登録

Program Block Assembler は、受け取った認識イベントと振る舞い情報からプログラムブロックを構成し、テーブル上に「プログラムブロック登録ボタン」を表示する。このボタンに触れると、Program Block Memory にプログラムブロックが送られ、格納される。その際、すでに格納済みの認識イベントを確認し重複する場合は上書き処理を行う。

③ プログラムブロックの実行

Event Processor が「プログラム実行ボタン」からの入力を確認すると、Robot Controller に処理を移行する。Robot Controller は Program Block Memory にアクセスし、プログラムブロックとして格納されている振る舞い情報を実行する。Event Processor は新たな認識イベントが発生するたびに、Robot Controller にそのイベントの情報を送信する。Robot Controller は受信したイ

ベントと Program Block Memory に格納されているプログラムブロック中の認識イベントを照合し、一致する認識イベントの振る舞い情報を Executor に実行させる。ロボットの動きはトラッキングされるため、指定された振る舞い情報からの誤差を取得できる。Calibrator は、この誤差を補償するために補正された振る舞い情報を Executor に送信する。

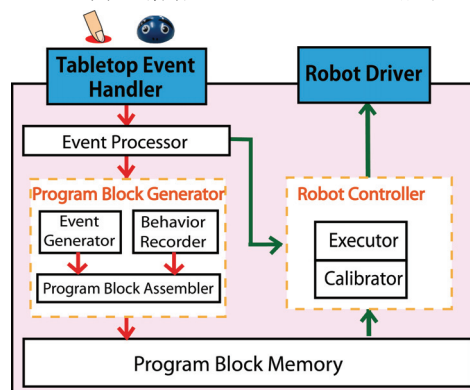


図1 システム構成

提案システムの拡張として、2次元的に移動するロボットに加え、高さ変更可能なシリンダ型ロボットを構築した。図2に示す通り、本ロボットは、学習者による力覚(押す, 引っ張る)操作により3次元的な位置変更が可能である。本ロボットは都市計画や3D ユーザインタフェースへの応用を想定している。

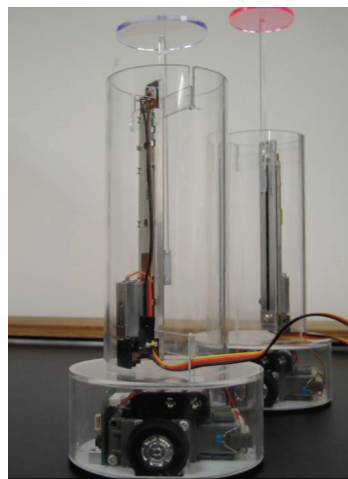


図2 シリンダ型ロボット

4. 研究成果

以下では、評価実験を踏まえつつ研究成果について説明する。

(1) 概要

提案手法を評価するための実験を行った。比較実験を行うため、グラフィカルなブロックを指で操作して組み合わせながらプログラミングを行うグラフィカル手法を、提案手法と同様のテーブル上に構築した。比較するプログラミング環境として、物理的なブロックなどを積み重ねたり連結したりすることによるタンジブルなプログラミン

グ環境を用いることも考えられる。しかし、本稿では RoboTable2 の最初の実験として、マルチタッチ入力可能なテーブルトップ環境での提案手法の効果を明らかにすることを目標とするため、広く用いられているグラフィカル手法を比較対象とした。

被験者は、グラフィカル手法および提案手法の2つのプログラミング手法を利用する。ロボットを掴んでその振る舞いを設定できる提案手法とは異なり、グラフィカル手法では振る舞いを設定するパラメータを右下のスライダに触れて設定する。評価実験のタスクとして、ロボットがバーチャルな障害物を回避しながらゴールを探索する maze を採用した。評価実験では、まず最初に、実験者が被験者に対し2種類のプログラミング手法の説明を行った。被験者がタスクの内容を理解しプログラミングに十分慣れた後、実験を開始した。実験では各被験者に対し、2種類のプログラミング手法と maze のマップをランダムに選択して提供した。ロボットがゴールに到達した時点でタスクを終了し、各プログラミング手法に関するアンケートへの記入を求めた。

被験者が回答したアンケート項目を以下に示す。

- ① 項目1: プログラミング手法の理解しやすさ
- ② 項目2: 認識イベントの設定しやすさ
- ③ 項目3: 振る舞いの入力しやすさ
- ④ 項目4: 作成したプログラムに対する満足度

アンケートでは、以上の5項目を7段階のリッカート尺度(1:全く当てはまらない, 2:当てはまらない, 3:やや当てはまらない, 4:どちらでもない, 5:やや当てはまる, 6:当てはまる, 7:非常に当てはまる)で評価を求めた。「作成したプログラムに対する満足度」は、作成されたプログラムによるロボットのイベント認識や振る舞いに対し、被験者がどの程度満足できたかを評価するための項目である。アンケートではさらに、プログラミング手法に関する問題点や気づいたことなどについてコメント欄への記入を求めた。実験中はプログラミングに要した時間を測定するとともに、ビデオ撮影を行った。実験中に学習者が行ったすべての操作ログは、システムによって自動的に記録された。

(2) 実験結果

順序尺度のため、Wilcoxon の符号付順位和検定を用いた。その結果、項目2 ($p < .01$)、項目3 ($p < .01$)、4 ($p < .05$)において、2つの手法に有意差が確認された。

さらに、作成されるプログラム数についても比較を行った。t検定を適用した結果、提案手法の方がより多くのプログラムブロックが作成されたことを有意に多いことが確認された ($t(9) = 2.69$, $p < .05$)。

評価実験の結果、提案手法はグラフィカル

手法よりも認識イベントの設定、振る舞い情報の入力、作成したプログラムの満足度において優れていることが示せた。一方、プログラミング手法の理解のしやすさに関しては、有意な差はなかった。つまり、手順のそのものはいずれの手法についても、学習者が容易に理解できる一方、それを実際に使ってプログラミングを行う場合に差が現れたことが分かる。さらに、プログラムブロック数に関しては、提案手法の方がより多かった。以上から、提案手法によって、より容易かつ効率的で直感性の高いプログラミングが可能になり、ロボットの動きに対する被験者のアイデアがより多く表現できたと考えることができる。

(3) 学習者自身によるコンテンツ構築

提案手法により、学習者自身でシミュレーション環境等のコンテンツ構築を行う様子を確認する実験を行った。以下では、交通シミュレータ作成実験について述べる。提案手法を用いたプログラミング環境では、実世界で使用される信号、各種の交通標識等がバーチャルなオブジェクト(アイコン)として用意された。学習者は、指で自由に道路を描き、パレット上に配置された上記のアイコンを選んで任意の場所に配置する。被験者は例えば「注意散漫な運転手」の自動車をシミュレーションするために、ロボットの認識イベント領域を小さく設定することで「止まれ」の標識に気付きにくいようにプログラムブロックを作成したり、あるいは信号機の設定(赤や青の点灯時間)を変えることで車の流れを制御したりすることができる。

5人の被験者が交通シミュレーション構築に要した時間は平均16分43秒(最大24分11秒, 最小10分36秒)であった。また、作成された平均アイコン数およびプログラムブロック数は、それぞれ6.8個(最大11個, 最小4個)、16.8個(最大24個, 最小11個)であった。

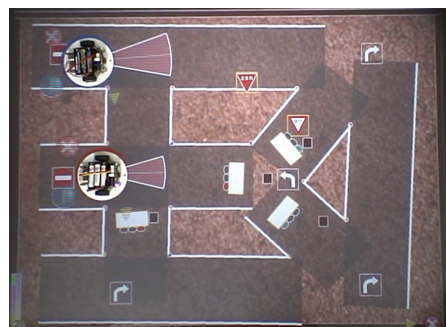


図3. 作成された交通シミュレータの例

学習者が作成した交通シミュレーションの例を図3に示す。この学習者は繁華街の交通を想定し、交差点を含む道路地図を作成してロボットプログラミングを行った。本シミュレーション例の完成まで10分36秒を要し、作成されたアイコン数は9個、2台のロボット用に作成されたプログラムブロック数は

20 個であった。

参加した学習者全員から、「ロボットプログラミングの過程での困難はなかった」、「あまり複雑でなければ、自分の考えているシミュレーション環境を容易に実現できそう」、「(交通標識の位置を指を触れて変えるなど)シミュレーション設定を容易に変更できるので、異なる条件で簡単に何度でも試せる」、「ロボットを使うことで、よりシミュレーションのリアリティが高まる」「より多くのロボットを配置できれば、より現実的な交通シミュレーションが可能ではないか」との回答を得た。

これらの回答は、物理的なロボットに対するテーブルトップ上でのプログラミング手法が学習者自身によるコンテンツ構築を支援でき、その有用なアプローチとなる可能性を示していると考えられる。主な否定的意見として「限られた広さのテーブル上ではロボットを小型にする、またはテーブルをより大きくする必要はある」、「ロボットの認識領域、認識イベント、振る舞いの設定や表現が制限されている」が挙げられた。一方、表現力を高めるためには、抽象的な概念の理解や煩雑な操作を学習者に要求するシステム設計が必要になる。そのため、たとえば複数のプログラムブロック間の優先度についての理解やその決定および入力に関して、学習者に適切な支援を与えることができるシステムの実装が求められる。よって、今後の研究では更なる実験を通して、システム設計と表現力に関するこのようなトレードオフについて検討を進める予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- 1 Sugimoto, M., Fujita, T., Mi, H., Krzywinski, A.: RoboTable2: A Novel Programming Environment using Physical Robots on a Tabletop Platform, ACM Computers in Entertainment (査読有, 採録決定).
- 2 藤田 智樹, 米 海鵬, 杉本 雅則: テーブルトップ環境における新しいロボットプログラミング手法の提案, 情報処理学会論文誌, Vol.53, No.3, pp.1101-1109 (2012, 査読有).
- 3 Mi, H., Krzywinski, A., Fujita, T., Sugimoto, M.: RoboTable: An Infrastructure for Intuitive Interaction with Mobile Robots in a Mixed Reality Environment, Journal of Advances in Human-Computer Interaction, Volume 2012, ID 301608, 10 pages (2012, 査読有).
<http://dx.doi.org/10.1155/2012/301608>
- 4 Sugimoto, M.: A Mobile Mixed Reality

Environment for Children's Storytelling using a Handheld Projector and a Robot, IEEE Transactions on Learning Technologies, Vol.4, No.3, pp.249-260 (査読有, 2011).

[学会発表] (計 4 件)

- 1 Mi, H., Sugimoto, M.: Creating a Tabletop Learning Environment Using Physical Robots, In Proceedings of ICCE 2012 Workshop on Tabletops for Learning: Opportunities and Challenges, Singapore (2012 年 11 月 27 日).
- 2 Mi, H., Sugimoto, M.: HATs: Interact Using Height-Adjustable Tangibles in Tabletop Interfaces, In Proceedings of ACM ITS 2011, Kobe, Japan, November, pp. 71-74 (2011 年 11 月 14 日).
- 3 Sugimoto, M., Fujita, T., Mi, H.: RoboTable2: A Novel Programming Environment using Physical Robots on a Tabletop Platform, In Proceedings of ACM ACE2011, Lisbon, Portugal (2011 年 11 月 9 日).
- 4 Mi, H., Sugimoto, M.: Design, Implementations and Applications of Bidirectional Tangible Interfaces in a Tabletop Computing Platform, In UbiComp 2011 Workshop on the Role of Design in UbiComp Research and Practice, Beijing, China (2011 年 9 月 17 日).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者 杉本 雅則 (SUGIMOTO)

Masanori)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90280560

(2) 研究分担者 稲垣 成哲 (INAGAKI
Shigenori)

神戸大学・人間発達環境学研究科・教授

研究者番号：70176387

(3) 連携研究者

(なし)

研究者番号：