

# 論文の内容の要旨

Integrated Graphical Representations  
for Development of Programs  
with Real-world Input and Output

(実世界入出力を伴うプログラムの画像表現を用いた開発支援手法)

氏名 加 藤 淳

Development of programs with real-world input and output (real-world I/O) including interactive camera-based programs and robot applications suffers from difference between development and runtime environments. While integrated development environments (IDEs) resides in the traditional desktop environment, the runtime environment is in the real world. Real-world I/O data stand for specific situations or their dynamic changes, which cannot be represented well by the existing text-based user interfaces of IDEs. Previous efforts on eliminating the gap between the development and runtime environments include Programming by Example (PbE), in which the user demonstrates operations to the system and the system infers and executes the program. In PbE systems, the program is specified using the runtime environment. The drawback is that the PbE system does not allow the user to precisely describe the logic of the program.

This dissertation coins the term “Programming with Example (PwE)”, which describes a hybrid approach combining PbE and text-based programming. It makes use of example data retrieved from the real world during text-based programming. We propose to integrate graphical representations such as photos and videos which represent real-

world I/O data into text-based IDEs. In particular, we provide a model of the program that deals with real-world I/O  $out = f(in, c)$  where  $c$  describes static parameters provided prior to the execution of the program (i.e., constants),  $in$  and  $out$  are dynamic input and output provided during the program execution (i.e., variables) and  $f$  is the specification of the program (i.e., the functionality). Accordingly, we discuss three types of graphical representation.

First, we discuss use of photos as a graphical representation of certain situations in the real world. As an experimental implementation, we present *Picode* IDE which supports development of posture data processing applications that handle the posture information of humans and robots. It uses photos to represent the posture information whose textual references are difficult to understand. It allows the programmer to take a photo of the subject to automatically capture the posture information, supporting PwE that retrieves static data from the real world. The photos are shown inline in the source code editor and provide contextual information that makes it easy to imagine the posture, providing intuitive coding experience.

Second, we discuss use of videos as a graphical representation of variables whose contents are dynamically updated during the program execution. As an experimental implementation, we present *Deja Vu* IDE which supports development of interactive camera-based applications. It visualizes and automatically records camera input, intermediate processing results, and window output. It supports PwE that records and utilizes the dynamic behavior of the program. It allows the programmer to replay the recorded data with a video player-like interface to understand the behavior. It also allows him to update all output from the program by re-executing it with the recorded input data.

Third, we discuss a method to specify the program behavior with help of graphical editing. As an experimental implementation, we present *Visionsketch* IDE which supports development of image processing applications, detecting interesting events from videos recorded with a fixed viewpoint. It requires the programmer to specify the video source at the beginning of the development for PwE support. The programmer can specify region of interest in the example video to narrow down the list of applicable image processing algorithms or to setup parameters of a selected image processing algorithm.

These experimental implementations are respectively designed for different target applications. However, each one of them supports the entire workflow of the programmer by integrating a graphical representation into a text-based programming environment. Every graphical representation stands for real-world I/O data sampled from the real world. While this dissertation focuses on visual information, there are other types of real-

world I/O data including sound, haptic technology, smell and taste. We foresee that applications which make use of these multi-sensory information will become more important. Development of programs that deal with real-world I/O inherently requires programming with examples. Therefore, we believe that the findings in this dissertation will serve as a foundation for systematic support of the development of such applications.

カメラ映像のリアルタイム処理やロボットの制御のような実世界入出力を伴うプログラムの開発では、統合開発環境(IDE)がデスクトップにある一方で、実行環境は実世界である。プログラムの入出力データは実世界における状況や状況の時間変化を表しており、文字列表現ベースの既存の IDE では直感的に表現できない。このような開発環境と実行環境の溝をなくす試みとして、例示をもとにシステムがプログラムを推論及び実行してくれる例示プログラミング(Programming by Example, PbE)が提案されている。PbE は、実行環境においてプログラムを指示できるために前出のような問題が生じない一方、通常のプログラミングのようにロジックを精密に設計することが難しい。

本論文では、文字列表現を用いたプログラミングにおいて、PbE のようにシステムに例示した実世界入出力のデータを活用することを Programming with Example (PwE)と呼ぶ。そして、PwE を支援するために、実世界入出力のデータを写真や動画のような画像表現で表して IDE に統合する手法を提案する。とくに、実世界入出力を伴うプログラムを  $out = f(in, c)$  というモデルで表し、定数  $c$ 、変数  $in$  と  $out$ 、そして関数  $f$ のそれぞれに対応する画像表現について議論する。

まず、実世界における状況を表す静的な定数  $c$ を、写真を用いて表す手法について議論する。試作システムとして、人やロボットの姿勢情報を処理できるアプリケーション開発を支援する *Picode* IDE を提案する。文字表現が難しい人やロボットの姿勢データを写真で表し、ソースコードエディタに直接貼れるようにした。また、写真撮影と姿勢データの取得を同時に行うことで、静的データを活用する PwE を支援した。写真により実際の姿勢を想像しやすくなるため、直感的なコーディングが実現できる。

次に、プログラム実行中に動的に変化する変数  $in$  と  $out$  を、動画を用いて表す手法について議論する。試作システムとして、インタラクティブなカメラ入力を用いたアプリケーション開発を支援する *Deja Vu* IDE を提案する。カメラ入力、変数およびウィンドウ出力を可視化し、さらに自動的に録画することで、プログラムの動的な挙動を記録して活用する PwE を支援した。録画データを動画プレイヤーのように再生して挙動を深く理解したり、修正したプログラムに入力データを再度与えてデバッグを行える。

さらに、プログラムの処理内容  $f$ を、文字列ベースのソースコードだけでなく画像表現に対する編集操作も利用しながら指定する手法について議論する。試作システムとして、定点カメラで撮影された動画から有用な情報を抽出できる画像処理アプリケーション開発を支援する *Visionsketch* IDE を提案する。プログラムを開発する際にまず入力データとなる動

画を指定することで、次のような PwE を実現した。すなわち、動画像のなかで興味のある領域を図形ツールにより描画することで、適用可能な画像処理を絞り込んだり、画像処理のパラメタを直感的に指定できる。

各試作システムは、異なるアプリケーションをターゲットにしたものである。しかし、どのシステムにおいても、文字列表現ベースのプログラミングに、実世界入出力の例示データを表す画像表現を取り入れている。結果として、プログラマのワークフロー全体を支援できている。本論文では、実世界入出力のなかでも画像表現で表しやすい視覚情報を扱った。しかし、他にも音や触感、匂いや味などの実世界入出力があり、今後重要性を増してくると考えられる。実世界入出力を伴うプログラムの開発では、例示データを活用するプログラミングが必要となる。したがって我々は、本研究の知見が、さまざまな実世界入出力を伴うプログラムの開発支援手法における基盤として有用であると信じている。