

氏 名 HOAREAU Christian

学位（専攻分野） 博士（情報学）

学位記番号 総研大 1287 号

学位授与の日付 平成 21 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 A Model Checking based Framework for Context-Aware
Systems

論文審査委員 主 査 教授 佐藤 一郎
教授 中島 震
助教 加藤 弘之
教授 高野 明彦（国立情報学研究所）
教授 中島 達夫（早稲田大学）

論文内容の要旨

Context-aware computing refers to the idea that computing devices can sense and react to the physical environment where they are deployed. For example, a context-aware corporate office would intelligently respond to peoples locations and activities by self-adjusting its lighting and temperature automatically, thus reducing its energy footprint.

Context-aware systems need to model the real world by using increasingly complex and refined contextual-data representations. As a result, their design and management raise several challenges, which were not solved in existing works. Indeed, current location models lack any mechanism for querying the location of people, objects, or services, or do so in an ad-hoc fashion. An important and somewhat unexplored one is to guarantee that context-aware systems correctly capture the intent of their designers once deployed. For example, we might want to assure that the energy conservation of the aforementioned corporate office is actually preserved.

This thesis first surveys look at and evaluating most relevant approaches to modeling context for ubiquitous computing and evaluate existing works and then the usage of contextual information, in particular query processing approaches used to manage contextual information. We also discuss typical problems, shortcomings and challenges posed by context modeling at large, and highlight some proposals to address some of them.

We propose in this thesis a query processing and specification framework that alleviates designing and building context-aware systems. It guarantees the management of contextual information, and can be used for specifying the underlying rules of context-aware systems. Our approach encourages a high-level of abstraction for retrieving contextual information in a robust manner, and supports building “provably-correct” context-aware systems incrementally, by providing modularity and separation of concerns.

The proposed approach aims at complementing existing context-aware services wherein contextual information about the physical and computational environment-information about people, objects, and services, is modeled in a symbolic fashion, and is independent of any particular sensing technology. In current pervasive computing platform, contextual information and their underlying models are queried an ad-hoc

manner, because they paid little attention to theoretical issues. Which makes it impossible to guarantee the quality of the results being returned, and hence the availability and reliability of context-aware services.

The main idea behind our framework is to apply and adapt the principles of model checking to query the contextual data structures. Because such query mechanisms have to be sound, our approach is build upon a logic-based query language, called hybrid logic. It introduces the concept of nominals to modal logic, where nominals are propositional variables that are true at exactly one node in the Kripke structure. We extend the hierarchical space tree to a Kripke-like structure that serves as both a semantic and data model for location query processing. We therefore ensure that the results of any query (i) do not miss any information that satisfy its necessary and sufficient conditions and (ii) do not contain any information that does not satisfy the conditions. We analyze the computational complexity of the proposed approach. The addition of nominals do not increase the complexity of the model checking task so that the model-checking problem for the logic with binders is PSPACE-complete. The performance evaluation of our implementation proves that its complexity is available in a real system.

We also discuss its applicability to existing graph-based contextual models for smart spaces, e. g., museums and houses. By using our framework, when the underlying sensing system detects the presence of users in specified places, queries on the model returns the pair of users and places. Context-aware services can be response to the results of the queries. The thesis describes several practical scenarios of the framework. We believe that our framework has theoretical and practical contributions to ubiquitous computing, including context-aware services. The framework can be easily applied to context-aware services, because the approach itself can support general contextual information that can be modeled in a graph-structure, because it has a mathematical background to prove a variety of properties, soundness of queries, for context-aware services.

博士論文の審査結果の要旨

ユビキタスコンピューティングのもっとも代表的な応用はコンテキスト依存サービス (Context-aware Services) である。これは各種センサーによって取得した現実世界の状況、例えばユーザの位置や時間に応じて、ユーザなどに提供すべきサービスを選択・カスタマイズして提供するものである。このコンテキスト依存サービスを提供するには現実世界の状況をコンピュータ内でモデル化して、サービス側にその情報を提供する必要がある。しかし、既存の研究は現実世界に対応したモデル化方法を提案する段階にとどまっており、コンテキスト依存サービスを提供する上で必要となるモデル上で、現実世界のどのような状況になっているのかを調べる方法はほとんど進んでいないのが現状であった。一方で、Christian Hoareau 君の研究はモデル上で現実世界の状況を問い合わせ、それに応じてサービス提供する方法を提案・評価している。なお、モデル上で現実世界の状況の問い合わせは単に状況を調べられるだけではなく、該当する情報をもれなく調べられるかなどの健全性を保証しないとイケない。これは例えば関係データモデルでは SQL に代表される問い合わせ言語に対して関係代数という理論的な背景を与えることにより、SQL の問い合わせに健全性を与えることと類似しているが、コンテキストの取り扱い上、関係代数ではなく、新しい理論体系が必要となる。Christian Hoareau 君の学位論文は、まず数学的な背景として、クリプケなどによる可能世界モデルを導入し、様相論理をベースとした問い合わせ言語を提案しており、問い合わせ言語として理論的な健全性と実装可能性を両立したものであり、新規性、有用性ともに非常に高い。さらに性能及び表現性の評価も行っており、実用性を考慮したモノとなっている。

さて論文は 94 ページ、7 章から構成されている。1 章において論文全体を概観し、2 章において研究対象についてまとめている。そして 3 章において既存研究のコンテキストモデルの分類と研究状況をサーベイしている。4 章にコンテキスト処理に関する必要性を現状の研究状況をまとめている。なお、3 章と 4 章は当該研究を適切にまとめていることから、海外論文誌において招待論文として掲載されるなど、すでに高い評価を受けている。

5 章ではコンテキストモデルの問い合わせ機構としてモデル検査を利用した方法を提案している。グラフ構造によるコンテキストモデルは広く利用されているが、前述のように同モデルに対する問い合わせに関する研究としては先駆けとなる。さて同モデルに対する問い合わせ機構の研究が進まなかった理由としては、本モデルはその構造が複雑になることから、健全性を持った問い合わせであるか、つまり問い合わせ内容をもれなく見つけれられるかが厳密に判断できないことと、そして計算コストが大きくなることがあげられる。一方、本論文ではコンテキストモデルの問い合わせ機構として、ソフトウェア検証などで

利用されているモデル検査 (Model Checking) を利用した方法を提案するとともに、既存の問題を解決している。具体的には時相論理のひとつである分岐時相論理 (CTL) をベースに、コンテキストモデルに対応した問い合わせ言語を提案している。これは分岐時相論理の様相表現を時間から空間に拡張したものである。具体的には現在地点という概念をパラメータとして導入することで、空間上の特定の位置を基準にした問い合わせを可能にしている。これは様相論理の拡張としても評価に値する。また、提案した問い合わせの言語の特性を明確にするために、提案した言語に対する文法を厳密に定義するとともに、クリプケの可能世界モデルを用いて意味を定義し、問い合わせ言語に関する基本的な性質を明らかにしている。そして、その実装について説明するとともに、プロタイプシステムの性能を評価している。

6 章は提案した問い合わせ言語及び機構の応用事例をいくつかあげている。それはいずれも実際的なコンテキスト依存サービスを想定したものであり、本論文の提案方法の実用性の高さを示すものとなっている。そして 7 章において結論と将来の課題をまとめている。

Christian Hoareau 君の研究は、コンテキストモデルに対する問い合わせ言語を数学的に定義し、その実装と応用を通じて有用性を示しているものである。また、同君の成果は新規性が高いばかりか、ユビキタスコンピューティングにおける代表的な応用である、コンテキスト依存サービスの実現における課題を解決するものであり、有用性においても高く評価できる。そして本研究の成果の一部は英文論文誌 2 篇、国際会議論文 5 に掲載されており、研究業績も学位取得の基準を充たしている。これらのことを総合し、提出論文が博士 (情報学) の学位として十分にふさわしい内容のあるものと判定した。