УДК 621.396

DOI 10.35211/1990-5297-2020-9-244-94-99

*М. С. Щекотов, М. П. Пашкин, С. В. Савосин, О. В. Смирнова***МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИИ
ГИБРИДНОЙ МОДЕЛИ НАВИГАЦИИ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ*****СПИИРАН**

shekotov@iias.spb.su, michaelpushkin@iias.spb.su, SVSavosin@iias.spb.su, sov_oogis@iias.spb.su

Предлагаемый метод автоматической конфигурации гибридной модели навигации людей и мобильных роботов внутри помещений позволяет создать единое семантическое описание контекстной информации, параметров методов навигации, а также правил конфигурации и калибровки этих методов с помощью онтологии навигации и системы правил.

Ключевые слова: навигация внутри помещений, мобильные роботы онтология, OWL, SWRL.

*M. S. Shchekotov, M. P. Pashkin, S. V. Savosin, O. V. Smirnova***THE METHOD OF HYBRID INDOOR NAVIGATION MODEL
AUTOMATIC CONFIGURATION****SPIIRAS**

The proposed method of automatic configuration of the hybrid model of navigation of people and mobile robots inside the premises allows creating a unified semantic description of contextual information, parameters of navigation methods, as well as configuration rules and calibration of these methods using the navigation ontology and rules system.

Keywords: indoor navigation, mobile robots, ontology, OWL, SWRL.

Введение

Одной из актуальных проблем создания систем, основанных на концепции «Индустрия 4.0» и использовании технологий Интернета вещей, является интеграция различных вычислительных ресурсов для их взаимодействия друг с другом в информационном и физическом пространствах. Решающие данную проблему киберфизические системы базируются на инфраструктурах, обеспечивающих связь, вычисления, управление, и объединяющих сенсоры, вычислительные устройства, сервисы и средства коммуникаций. Человек, пользующийся своим смартфоном, или мобильный робот могут являться как потребителями, так и ресурсами подобных систем, что делает актуальной задачу создания систем навигации внутри помещений для людей и мобильных роботов, функционирующих по единым протоколам и на единой платформе. Предлагаемый метод автоматической конфигурации гибридной модели навигации внутри помещений позволяет создать единое семантическое описание контекстной информации, параметров методов навигации, а также правил конфигурации и калибровки этих методов.

Реализация систем навигации внутри помещений на основе обработки радиосигналов связана с такими проблемами как многолучевое распространение сигналов, их отражение и преломление; необходимость создания карт помещений; размещение необходимой инфраструктуры, а именно точек доступа Wi-Fi или меток Bluetooth; зависимость точности навигации от количества и местоположения точек доступа; а также распространение сигнала в зоне прямой видимости.

Для решения задачи навигации внутри помещений широко используются метод радиопечатков, метод мультилатерации и метод счисления координат (Pedestrian Dead Reckoning). Метод радиопечатков основан на измерении уровней сигнала в заранее определенных точках, которое выполняется специалистом на этапе настройки (офлайн-фаза). В онлайн-фазе или навигационной фазе местоположение объекта оценивается путем сравнения измерений, сделанных в онлайн-фазе, с предварительно собранными измерениями в офлайн-фазе. Этот метод позволяет достичь точности локализации около 2,5–3 м [1]. Метод мультилатерации уровней сигнала оперирует моделью распростране-

© Щекотов М. С., Пашкин М. П., Савосин С. В., Смирнова О. В., 2020

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 19-07-00886, № 19-07-00630 и № 20-07-00560) и бюджетной темы № 0073-2019-0005.

ния радиосигнала в помещении, на основе которой можно оценить расстояние до источников сигнала. Сложность реализации систем навигации внутри помещений на основе этих методов характеризуется необходимостью измерения уровней сигнала с целью создания базы данных радиоотпечатков или калибровки параметров модели распространения сигнала. Такие шаги существенно усложняют развертывание систем навигации внутри помещений и приводят к значительному удорожанию их внедрения.

Существует ряд разработанных семантических моделей и онтологий, фокусирующихся на представлении помещений, таких как IndoorGML [2] и BIGML [3]. IndoorGML предоставляет модель пространственных данных и правило кодирования обмена для взаимодействия различных компонентов в системах навигации внутри помещений. IndoorGML использует XML-схему OGC GML (Geography Markup Language) для выражения географических объектов. Модель описывает двухмерные и трехмерные пространственные объекты, а также их геометрию. IndoorGML описывает также топологию внутренних пространств, то есть отношения между ячейками [4]. Геометрическое и семантическое информационное моделирование предложено в OntoNav [5]. OntoNav состоит из сервисов навигации, вычисления геометрического пути и выбора семантического пути, которые используют навигационную онтологию, профили пользователей и данные пространственной базы данных. Цветная модель сети Петри (CPN), используемая в качестве представления онтологии RDF [6]. В работе [7] описана многоуровневая онтология навигации в помещении, описывающая несколько типов узлов и маршрутов, соответствующих им ролей, которые активируются в зависимости от текущей ситуации в здании, например, обычной или аварийной ситуации. В работе [8] была разработана онтология для системы визуального определения местоположения внутри помещений. Онтология предназначена для решения задач определения препятствий, обнаружения объектов, стен и проходов, а также определения направления движения. Классы онтологии включают в себя: классы, описывающие основные концепты, классы пространственных измерений и классы геометрии объекта. В работе [9] предложена модель классификации помещений на основе онтологии помещений, которая учитывает, как их семантические, так и геометри-

ческие характеристики. Эта модель является расширением стандарта IndoorGML.

Целью данной работы является создание метода автоматической конфигурации, позволяющего автоматически использовать наиболее подходящий метод навигации (PDR и/или мультилатерация) и производить его калибровку в зависимости от контекстной информации на основе единого семантического описания параметров методов навигации, правил конфигурирования и калибровки. В качестве инструмента для создания упомянутых выше семантического описания параметров методов навигации и правил конфигурирования и калибровки были выбраны язык описания онтологий OWL и язык правил SWRL.

Гибридная модель навигации внутри помещений

В основе гибридной модели навигации внутри помещений лежит использование таких методов, как метод счисления координат, использующий данные гироскопа и акселерометра, а также метода мультилатерации сигналов Wi-Fi и Bluetooth. Данные методы могут быть использованы по отдельности или оба сразу в зависимости от контекстной информации, поступающей от датчиков мобильного робота или смартфона пользователя. Для управления процессом навигации с использованием того или иного метода предлагается использовать онтологию навигации, которая включает в себя концепты и правила, определяющие то, какой метод должен использоваться.

Предлагаемая онтология навигации внутри помещений позволяет обрабатывать события, происходящие в процессе навигации, используя различные типы контекстной информации, которые могут быть получены датчиками мобильного робота или смартфона пользователя, а именно: уровни сигнала точек доступа Wi-Fi или Bluetooth-маяков, углы поворота мобильного робота или пользователя со смартфоном, информация о том, сделал ли пользователь шаги, и изменились ли уровни сигнала точек доступа Wi-Fi или Bluetooth-маяков при отсутствии каких-либо движений пользователя. Онтология позиционирования и навигации хранит измерения углов поворота и уровней сигналов (RSS), логические значения фактов возникновения событий для обработки с использованием правил и время, в которое были сделаны измерения. Таким образом, онтология содержит основные концепты для описания типов инфор-

мации, упомянутых выше: «измерение», «расстояние», «относительный угол», «абсолютный угол», «уровень сигнала», «точка доступа», «время» и «событие». Эти концепты используются для построения правил обработки событий, возникающих при перемещении пользователя в помещении, с целью повышения точности позиционирования и навигации.

Концепты, расширяющие концепт события, включают в себя (рис. 1):

- «Calibration» – событие, имеющее длительность и соответствующее началу процедуры калибровки;
- «NavigationInTheRoom» – событие, связанное с нахождением в определенной комнате во время процессов позиционирования и навигации;
- «AccessPointFound» – событие, соответст-

вующее входу пользователя в зону с наибольшим уровнем сигнала;

- «DynamicObstacleFound» – событие, соответствующее появлению других людей (событие обнаруживается, если уровень сигнала точки доступа или маяка существенно изменился при отсутствии движения со стороны пользователя);

- «AccessPointInTheBack» – событие, соответствующее моменту, когда пользователь поворачивается спиной к точке доступа или маяку, не предпринимает никаких шагов, но изменяет угол поворота, что приводит к значительному снижению уровня сигнала;

- «Rotation» – событие, соответствующее пользовательскому вращению;

- «Step» – событие, соответствующее шагу, сделанному пользователем.

Рис. 1. Концепты, расширяющие концепт «Event»

Для обнаружения сложных событий, например, когда пользователь входит в зону, где уровень сигнала всех точек доступа или маяков является слабым, используются история измерений и соответствующее правило, которое определяет, что пользователь вошел в такую зону. История состоит из экземпляров концепта «Measurement», которые содержат время измерения.

Концепт «Measurement» – это основной концепт онтологии, который нужен для представления измерений, предоставляемых алгоритмами навигации внутри помещений, основанными на использовании датчиков мобильного робота или смартфона пользователя. Пусть измерением является кортеж M , который можно определить, как

$$M = (N, d, \alpha, \beta, P_r, s, r, t), \quad (1)$$

где N – идентификатор точки доступа; d – расстояние между пользователем и точкой доступа; α – угол поворота относительно точки доступа $[0, 180^\circ]$; β – угол поворота пользователя относительно общей системы координат; P_r – уровень сигнала; s – флаг шага; r – флаг поворота; t – время измерения.

Таким образом, понятие измерения может быть описано с помощью онтологии, как множество отношений экземпляров концептов. Префикс «ino:» добавляется ко всем концептам и отношениям онтологии навигации. Префикс «time:» соответствует свойству онтологии OWL Time Ontology. Концепт «Time position» представляет собой время, в которое производится измерение.

Рис. 2. Представление концепта «Measurement»

Событие, когда пользователь входит в помещение, приводит к значительному увеличению мощности принимаемого сигнала. Для этого предлагается правило, которое может определить, как отличить причину увеличения уровня сигнала. В соответствии с построенным

фрагментом онтологии внутренней навигации можно написать правило, которое может обнаружить этот случай, для чего используется язык описания правил SWRL. SWRL-правило для определения этого события, может быть записано следующим образом:

$$\begin{aligned} &Measurement(?m) \wedge hasDetectedStep(?m, ?s) \wedge hasRSS(?m, ?rss) \\ &\wedge swrlino : moreThan(?rss, < P_{rb} >) \wedge Event(?e) \rightarrow NavigationInTheRoom(?e), \end{aligned} \quad (2)$$

где m – переменная экземпляра измерения концепции; s – флаг шага, сделанного пользователем; rss – уровень сигнала; P_{rb} – значение пороговой константы уровня сигнала; e – экземпляр концепта «Event».

Для представления онтологии позиционирования и навигации были выбраны язык описания онтологии OWL [10] и язык правил SWRL [11]. Кроме того, онтология имеет необ-

ходимые концепты для представления временных интервалов, импортированные из существующей онтологии OWL Time Ontology [12]. Разработанная онтология описывается дескрипционной логикой SROIN(D) [13] и имеет сложность NExpTime-hard для задач выполнимости концепта и проверки консистентности системы утверждений об индивидах ABox. Таким образом, гибридная модель навигации внутри поме-

Рис. 3. Гибридная модель навигации внутри помещений

щений представляет собой ядро, включающее в себя онтологию навигации с основными концептами, которая включает в себя историю измерений; математические модели методов счисления координат и мультилатерации, а также методы их калибровки и коррекции ошибок (рис. 3).

Программная реализация представляет из себя серверное приложение, написанное на языке Java с применением библиотеки Apache Jena для выполнения операций над онтологией и движка правил Drools для выполнения правил. Серверное приложение имеет публичный REST API, с помощью которого пользователь со смартфоном или мобильный робот может взаимодействовать с сервером.

Автоматическое конфигурирование гибридной модели навигации внутри помещений

С помощью системы правил онтологии навигации открывается возможность конфигурировать гибридную модель навигации внутри помещений в зависимости от контекстной информации. Так имеет смысл использовать метод счисления координат в случае, если отсутствуют сигналы каких-либо точек доступа, ли-

бо если параметры модели распространения сигнала не откалиброваны. Таким образом, метод счисления координат используется для определения реального местоположения пользователя, измерения уровней сигналов и калибровки модели распространения сигнала. Однако этот процесс чувствителен к накопленным ошибкам при повороте и определении пройденного расстояния. В связи с этим предлагается использовать знание об уровне сигнала вблизи точек доступа Wi-Fi или тегов Bluetooth для коррекции местоположения пользователя. Попадание в зону близости источника сигнала позволяет полуавтоматически калибровать [14–16] модель распространения сигнала и наносить сам источник сигнала на карту помещения в качестве опорной точки. Нахождение хотя бы трех источников сигнала позволит при мультилатерации сигналов уточнить координаты точек локализации, полученные методом PDR. В случае, когда калибровка хотя бы трех точек доступа завершена, начинает использоваться метод мультилатерации. Метод автоматической конфигурации гибридной модели навигации может быть представлен в виде следующего алгоритма:

Алгоритм 1 Автоматическая конфигурация гибридной модели навигации

- 1: ПОКА** Пользователь перемещается внутри помещения
 - 2:** В Историю измерений сохраняется $M = (N, d, \alpha, \beta, P_r, s, r, t)$;
 - 3: ЕСЛИ** есть сигнал менее, чем от 3 неоткалиброванных точек доступа **ТО**
 - 4:** Определение текущих координат на основе предыдущей позиции (PDR);
 - 5: ИНАЧЕ** Определение текущих координат с помощью мультилатерации
 - 6: КОНЕЦ ЕСЛИ**
 - 7: ЕСЛИ** Пользователь находится в зоне ближайшей к точке доступа **ТО**
 - 8:** Производить автоматическую калибровку модели распространения сигнала;
 - 9: ЕСЛИ** Координаты точки доступа известны **ТО**
 - 10:** Произвести коррекцию местоположения и углов поворота;
 - 11: КОНЕЦ ЕСЛИ**
 - 12: КОНЕЦ ЕСЛИ**
 - 13: ЕСЛИ** Пользователь повернулся спиной к точке доступа **ТО**
 - 14:** Произвести коррекцию местоположения и углов поворота;
 - 15: КОНЕЦ ЕСЛИ**
 - 16: ЕСЛИ** Обнаружено движущееся препятствие **ТО**
 - 17:** Произвести коррекцию местоположения и углов поворота;
 - 18: КОНЕЦ ЕСЛИ**
 - 19: КОНЕЦ ЦИКЛА**
-

Таким образом, с помощью правил онтологии производится автоматическое конфигурирование гибридной модели навигации внутри

помещений. Семантическое описание событий и основных концептов позволяет расширять данную модель новыми методами и условиями

их применения, гибко добавлять процедуры коррекции и калибровки этих методов.

Заключение

Методы, на основе которых производится навигация внутри помещений, не являются новыми, и их совместное использование для определения местоположения пользователя является стандартным решением при проектировании систем навигации внутри помещений. Однако использование семантического описания основных концептов задачи навигации внутри помещений создает унифицированную платформу для гибкого использования различных методов навигации в зависимости от контекстной информации, получаемой от датчиков мобильного робота или смартфона пользователя. Данная унифицированная платформа может в дальнейшем использоваться для взаимодействия мобильных роботов и людей в рамках киберфизической системы. Благодаря использованию системы правил бизнес-логика создаваемых на подобной платформе систем может гибким образом меняться в зависимости от требований, позволяя добавлять процедуры коррекции и калибровки в зависимости от контекстной информации и паттерна движения пользователя, а также охватывать различные ситуации, связанные с перемещением пользователя. Онтология открывает возможность расчета местоположения пользователя в зависимости от его истории перемещений. История перемещений и коррекции результатов открывает возможности по созданию обучающих выборок для использования методов машинного обучения, которыми может быть в свою очередь дополнена модель. Разработанная онтология может быть использована в качестве основы более сложной информационной модели и может обеспечить семантическую совместимость между компонентами систем, которые потенциально могут использовать эту информационную модель.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Alsehly, F.* Improving Indoor Positioning Accuracy through a Wi-Fi Handover Algorithm / F. Alsehly, R. Mohd Sabri, Z. Sevak, T. Arslan, // in Proc. of International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Jan. – 2010. – Pp. 822–829.

2. *Kim, J.-S.* Integrating IndoorGML and CityGML for indoor space / J.-S. Kim, S.-J. Yoo, K.-J. Li // in Proc. of International Symposium on Web and Wireless Geographical Information Systems. – 2014.
3. *Kessel, M.* BIGML: A location model with individual waypoint graphs for indoor location-based services / M. Kessel, P. Ruppel, and F. Gschwandtner // PIKPraxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation. – 2010. – Vol. 33(4). – Pp. 261–267.
4. *Lee, J.* A Spatial Access-Oriented Implementation of a 3-D GIS Topological Data Model for Urban Entities // Geoinformatica. – 2004 – Vol. 8. – Pp. 237–264.
5. *Tsetsos, V.* Semantically enriched navigation for indoor environments / V. Tsetsos, C. Anagnostopoulos, P. Kikiras, S. Hadjiefthymiades // International Journal of Web and Grid Services. – 2006. – Vol. 2(4). – Pp. 453–478.
6. *Yim, J.* Petri net-based ontology analysis method for indoor location-based service system / J. Yim, J. Joo, G. Lee // International Journal of Advanced Science and Technology. – 2012. – Vol. 39. – Pp. 75–92.
7. *Khruahong, S.* Multi-Level Indoor Navigation Ontology for High Assurance Location-Based Services / S. Khruahong, X. Kong, K. Sandrasegaran, L. Liu // in Proc. of IEEE 18th International Symposium on High Assurance Systems Engineering (HASE). – 2017. – Pp. 128–131.
8. *Fernando, N.* Modelling indoor spaces to support vision impaired navigation using an ontology based approach / N. Fernando, D. Mcmeekin, I. Murray // in Proc. of Indoor Positioning and Indoor Navigation. – 2019.
9. *Maheshwari, N.* Development of an Indoor Space Semantic Model and Its Implementation as an IndoorGML Extension / N. Maheshwari, S. Srivastava, K. Rajan // ISPRS International Journal of Geo-Information. – Vol. 8. – 2019.
10. *OWL 2 Web Ontology Language Document Overview (Second Edition) / W3C* : официальный сайт. – URL : <https://www.w3.org/TR/owl2-overview/> (дата обращения: 01.06.2020).
11. *SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML / W3C* : официальный сайт. – URL : <https://www.w3.org/Submission/SWRL/> (дата обращения: 01.06.2020).
12. *Time Ontology in OWL / W3C* : официальный сайт. – URL : <https://www.w3.org/2001/sw/BestPractices/OEP/Time-Ontology> (дата обращения: 01.06.2020).
13. *Horrocks, I.* The even more irresistible SROIQ / I. Horrocks, O. Kutz, U. Sattler // In Proc. of KR. – 2006. – Pp. 57–67.
14. *Shchekotov, M.* Indoor Navigation Ontology for Smartphone Semi-Automatic Self-Calibration Scenario / M. Shchekotov, M. Pashkin, A. Smirnov // in Proc. of 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). – 2019. – Pp. 388–394.
15. *Shchekotov, M.* Semi-Automatic Self-Calibrating Indoor Localization Using BLE Beacon Multilateration // in Proc. of 23rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT). – 2018.
16. *Shchekotov, M.* Indoor Localization Methods Based on Wi-Fi Lateration and Signal Strength Data Collection // in Proc 17th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). – 2015.