



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 72 за 2015 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Давыдов О.И., Платонов А.К.

Организация и структура
комплексной карты
операционной среды
сервисного робота

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Давыдов О.И., Платонов А.К.
Организация и структура комплексной карты операционной среды сервисного робота //
Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. № 72. 28 с.
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-72>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

О.И. Давыдов, А.К. Платонов

**Организация и структура
комплексной карты операционной среды
сервисного робота**

Москва — 2015

Давыдов О.И., Платонов А.К.

Организация и структура комплексной карты операционной среды сервисного робота

Данная работа является частью проекта разработки бортовой системы управления мобильного сервисного робота РБ-2 с установленным на нем манипулятором. В ней описывается Карта – "2.5D модель" операционной среды мобильного робота с упрощенным описанием вертикальных размеров объектов модели. В работе вводится понятие Ортофрейма как ключевого элемента модели, описываются его основные параметры, благодаря которым модель представляет собой комбинацию метрической, топологической и семантической моделей. В работе также рассматривается структура объекта модели операционной среды как комбинация Ортофреймов, описываются отношения между объектами модели, геометрические и топологические связи между ними. Приводятся примеры построения семантических описаний объектов и семантических отношений между объектами. Описывается процедура планирования маршрута движения.

Ключевые слова: мобильный сервисный робот, Ортофрейм, модель операционной среды, 2.5D Карта.

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-06431

Oleg Izmailovich Davydov, Alexandr Konstantinovich Platonov

Organization and structure of a combined map of an operating environment of a service robot

This work is a part of a project to develop the onboard control system of mobile service robot RB-2, mounted with a manipulator. It describes map - a "2.5D model" of the robot's operating environment with simplified description of the vertical dimensions of the model objects. This paper introduces the concept of Ortoframe as a key model element, describes its basic parameters, by which the model exists as a combination of metric, topological and semantic models. The paper also examines the structure of the object model of the operating environment as a combination of Ortoframes, describes the relationship between the model objects, geometric and topological relationships between them. Examples of construction of object semantic descriptions and semantic relationships between objects are presented. A procedure for planning robot's movement is described.

Keywords: mobile service robot, Ortoframe, environment model, 2.5D map.

Оглавление

Введение.....	3
1. Модель карты как 2.5D описания операционной среды	5
2. Основа модели – Ортофреймы	7
3. Структура данных Объектов Карты	10
4. Состав и структура Карты	12
5. Семантические компоненты карты	13
6. Программное обеспечение для формирования Карты	15
7. Построение рабочей области маршрута движения.....	17
8. Применение Карты для планирования движения	19
9. Отличие Карты от Оперативной модели	23
Заключение	25
Список литературы	26

Введение

Представляемая здесь работа является развитием проекта полуавтономного мобильного сервисного робота РБ-2, описанного в [1], [2], [3]. Проект направлен на получение опыта разработки недорогих, но эффективных систем управления автономными и полуавтономными *сервисными* мобильными роботами. По классификации Международной Федерации Робототехники [4] сервисный робот – это робот, который выполняет услуги для людей (исключая производство), действуя полу- или полностью автономно. По своему назначению робот должен иметь широкий набор функций и решать определенный диапазон задач в интересах человека. В отличие от индустриального робота, сервисный робот должен иметь большую степень автономии, обладать увеличенными способностями «понимания» окружающей обстановки и возможностями естественного взаимодействия с людьми.

По мнению авторов, в ближайшее время можно будет увидеть широкое развитие создания и применения роботов именно сервисного типа. Необходимым условием этого является процесс интеллектуализации систем управления роботами [5].

Сервисные роботы такого типа уже создаются [6], [7], [8], [9]. На рис. 1 приведена фотография одного из таких роботов, созданного в Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation в Германии.



Рис. 1. Сервисный робот Care-O-bot 3 [6]

Сервисные роботы предназначены для функционирования внутри помещений, приспособленных для жизни человека, но в условиях, когда по некоторым причинам нахождение постороннего человека в этих помещениях невозможно, нежелательно или нерационально. Это может быть связано с наличием опасности для здоровья и жизни человека внутри этих помещений или с удаленностью, труднодоступностью их местоположения, например, на

Крайнем Севере. В определенных жизненных условиях выгоднее использовать робота, чем постоянно держать человека, который должен просто наблюдать за ситуацией и только изредка, по мере необходимости, выполнять простейшие работы.

Ниже приводится примерный перечень основных функций и требуемых умений такого робота:

- перемещаться по помещению, контролируя его состояние;
- перемещаться между этажами, пользуясь лифтом;
- открывать/закрывать двери и проходить через них;
- отпирать/запирать двери;
- включать/выключать свет;
- находить предмет, известный роботу или оператору;
- переносить, переставлять или передвигать нетяжелый предмет;
- включать/выключать устройство или прибор;
- опознавать и исправлять нарушение порядка в окружающей среде;
- инициировать связь с оператором;
- информировать оператора о состоянии окружающей среды.

Для планирования поведения и для безопасного движения робот должен располагать моделью операционной среды. Проблеме построения моделей операционной среды робота в современной научно-технической литературе посвящено большое число работ: [10] ÷ [16]. В них представлены три основных типа таких моделей:

- метрическая, координатная;
- топологическая, сетевая;
- семантическая, предикатная.

Метрические модели обычно в том или ином виде используют координаты размеров и положения объектов в среде, окружающей робота [10] ÷ [13]. Они являются необходимым элементом первого слоя картографического обеспечения (ГИС) человеческой деятельности. Координатное описание среды обитания является наиболее привычным способом, и поэтому в робототехнике оно используется повсеместно.

Топологические модели, как правило, описывают операционную среду в виде сети, узлами которой обозначаются объекты в операционной среде, а дуги такой сети определяют свойства взаимного положения этих объектов. Такие модели необходимы для алгоритмической организации двигательного поведения робота среди объектов среды [14], [15].

Семантические модели описывают среду в виде набора предикатных выражений, т.е. логических отношений между объектами и свойствами отдельными объектами в операционной среде. В сервисном роботе эта составляющая особенно важна для функционального обеспечения диалога с человеком. Перед тем как понять текст сообщения, роботу необходимо иметь

описание семантики предметной области, чтобы затем связать с ней словарную и грамматическую структуру сообщения [16] ÷ [19].

Все три типа моделей по эффективности их конкретного применения имеют свои преимущества и недостатки. Они широко по отдельности исследованы в литературе [20], [21], [22]. При этом мозг человека всегда располагает всеми тремя моделями, которые комбинационно¹ объединены в единое целое, составляющее его знание среды обитания.

Целью данной работы является построение структуры данных и создание программного обеспечения для формирования *единой комплексной модели операционной среды робота, включающей все три типа описаний: и геометрическое, и топологическое, и логическое*. Данная модель будет использоваться в качестве карты среды в процессах управления движением сервисного мобильного робота.

1. Модель карты как 2.5D описания операционной среды

Мы живем и работаем в структурированном горизонтально-вертикальном мире наших жилых и общественных помещений. Пространство этих помещений и объемы, занятые мебелью, ограничены плоскостями, расположенными, в основном, горизонтально и вертикально.

Горизонтальные поверхности почти всегда представляют собой плоские поверхности. Трудно найти исключение из этого правила. Точность угла наклона такой поверхности обычно варьируется в пределах нескольких градусов, качество самой поверхности иногда оставляет желать лучшего, но люди привыкли этого не замечать. В подавляющем числе случаев эти поверхности вполне пригодны для размещения на них объектов, постоянно используемых людьми.

Вертикальные поверхности также обычно плоские, хотя встречаются и круглые и овальные, например, колонны, но и их можно представить в модели как последовательность вертикально поставленных плоскостей. Точность установки вертикальных поверхностей и их качество также хотя и не идеальны, но вполне отвечают их функциональному назначению.

Наклонные поверхности в такой среде встречаются крайне редко. Они, как правило, имеют декоративную цель и не используются функционально, за исключением небольшого числа специфических предметов, как, например, пюпитр для нот.

Такие свойства помещений обитания людей позволяют предположить,

¹ По одной из точек зрения в психологии сущностью понятия интеллекта человека являются именно его комбинационные способности. Это обстоятельство очень заметно в содержании IQ-тестов психотехники.

что вертикальная составляющая пространства операционной среды не имеет такого же значения, какое обычно имеют контуры плоскостей основания объектов в этой среде. Это обстоятельство дает возможность построить упрощенную метрическую модель, которая с хорошей точностью описывала бы 2D свойства плоскостей основания у каждого из объектов среды, а в качестве вертикальной составляющей грубо определяла бы только общую операционную высоту однородных объектов. В этом смысле определим такую модель как *2.5D модель* операционной среды. Этот термин взят из САПР-технологии механообработки на многокоординатных фрезерных станках.

Операционная среда робота состоит из объектов следующих видов:

- статические объекты, включая стены помещения, окна, проемы дверей, крупную мебель;
- полустатические объекты, такие как стулья, кресла, легко передвигаемая мебель, двери;
- динамические объекты, это люди, окружающие робота, передвигающиеся с нормальной скоростью.

Для таких объектов в проекте робота РБ-2 используются модели двух типов. Статическая модель описывает только статические и полустатические объекты. Оперативная модель описывает как статические, и полустатические, так и динамические объекты в окружении робота.

В этой работе мы будем рассматривать в основном Статическую модель среды – ее содержание, структуру устройства и способы использования. Статическую модель операционной среды, которая в структуре ее устройства объединяет Метрическую, Топологическую и Семантическую модели, мы ниже и называем "Картой" среды.

Карта используется системой управления робота в трех взаимосвязанных процессах:

- ее семантическая составляющая используется для общения с людьми;
- ее семантическая и топологическая составляющие используются для формирования двигательного поведения робота с манипулятором;
- ее топологическая и метрическая составляющие используются для управления движением платформы и звеньев манипулятора.

Карта состоит из специально организованных структур данных, описывающих свойства Помещений и их Объектов, являющихся образами реальных помещений и объектов в операционной среде. Карта создается человеком в ходе специальной процедуры и хранится в Базе данных робота РБ-2.

Карта, как 2.5D модель среды, не является точным метрическим образом реальной операционной среды. Дело в том, что типичные помещения, предназначенные для человека, не имеют абсолютно ровных стен и идеально прямых углов. Мебель обычно расставляется на глазок, часто не вплотную к стенам. Точные описания объектов реальной среды потребовали бы учета степени негоризонтальности и невертикальности поверхностей ее объектов.

Для описания Статической модели объектов сред высокая точность излишня. Описываемая ниже Карта, используемая роботом, представляет собой идеализированный, упрощенный, стилизованный геометрический образ операционной среды. На ней углы прямые, стены ровные и мебель выставлена идеально вдоль стен.

2. Основа модели – Ортофреймы

Все Объекты и Помещения Карты формируются из однотипных структурных элементов, Ортофреймов. Геометрически Ортофрейм является векторным Mesh-объектом, упрощенным и приспособленным к описанию пространства, окружающего человека в помещениях. Наличие ссылок для списков топологических связей и семантических меток, встроенных как в структуру Ортофрейма, так и в структуру Объектов, формируемых из Ортофреймов, является отличительной чертой этой модели.

Геометрически Ортофрейм состоит из плоского горизонтального основания в виде многоугольника и набора вертикально стоящих плоскостей, которые, собственно, и ограничивают объем Ортофрейма. Плоское горизонтальное основание – База Ортофрейма – замкнутый многоугольник на горизонтальной плоскости, ограниченный массивом векторов в некоторой принятой системе координат. Геометрия Ортофрейма представлена на рис. 2.

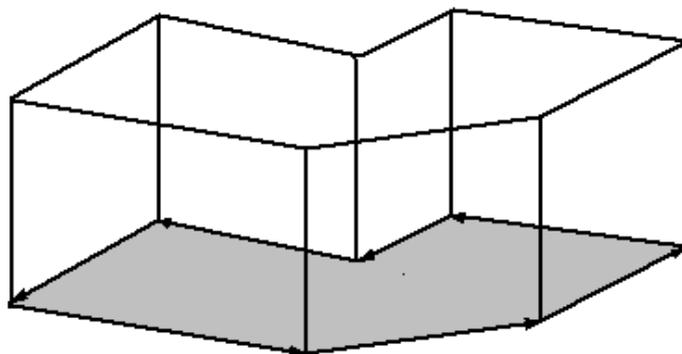


Рис. 2. Геометрия Ортофрейма

Последовательность векторов в массиве такова, что они обходят область

внутри Базы против часовой стрелки. Векторы, элементы массива задаются координатами начальной и конечной точек. При формировании или изменении метрических данных Ортофрейма предусмотрены процедуры определения связности и замкнутости его Базы.

Каждый вектор Базы обладает идентификатором, уникальным в рамках одного Ортофрейма. Каждому вектору присваивается группа параметров, определяющие топологические связи с векторами других Ортофреймов, маркеры типа и семантические имена данного вектора.

Таким образом, Ортофрейм хранит данные виртуального многогранника с основанием из векторов, формирующих Базу. Грани этого многогранника перпендикулярны горизонтальной плоскости Базы, а сверху этот объем завершается Потолком Ортофрейма – многоугольником, который является точной копией Базы Ортофрейма. База и Потолок всегда расположены горизонтально и являются нижней и верхней гранями Ортофрейма. С каждым Ортофреймом связывается метрический параметр, определяющий высоту его граней от плоскости Базы до Потолка.

На рис. 3 приведен пример простейшего Ортофрейма, с Базой, представляющей собой прямоугольник. Ортофреймы такой геометрии являются самыми распространенными при моделировании среды, в которой живут и работают люди.

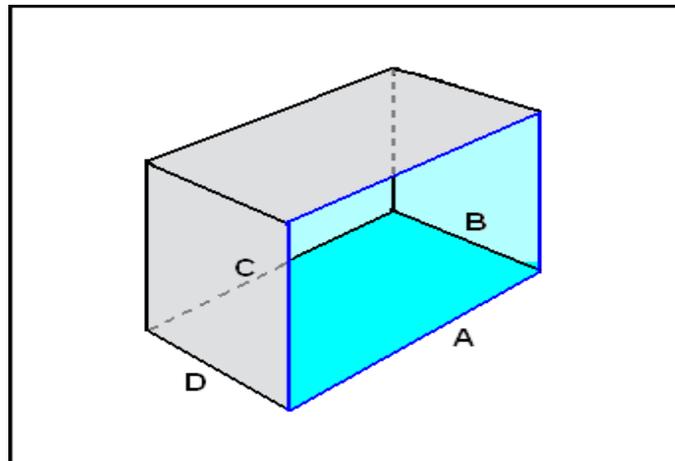


Рис. 3. Простейший Ортофрейм с Базой-прямоугольником

База, Потолок и три боковых грани Ортофрейма, изображенного на рисунке, являются образами твердых поверхностей - препятствий, которые считаются непреодолимыми при попытке проникновения посторонних объектов через эти грани. Четвертая грань, стоящая на векторе А, является моделью проницаемой поверхности. Через нее любые внешние объекты с меньшей шириной и высотой могут проникать абсолютно свободно. При

наличии воображения прямоугольный параллелепипед, представленный на Рис.3, можно представить как образ корпуса шкафа-стеллажа без передней стенки.

На рис.4 приведен Ортофрейм, который представляет собой часть модели комнаты. База этого Ортофрейма – план комнаты, представляет собой прямоугольник. Три боковых грани, стоящие на векторах В, С и D, являются образами поверхностей стен, непроницаемых препятствий, которые непреодолимы для проникновения внешних предметов через них.

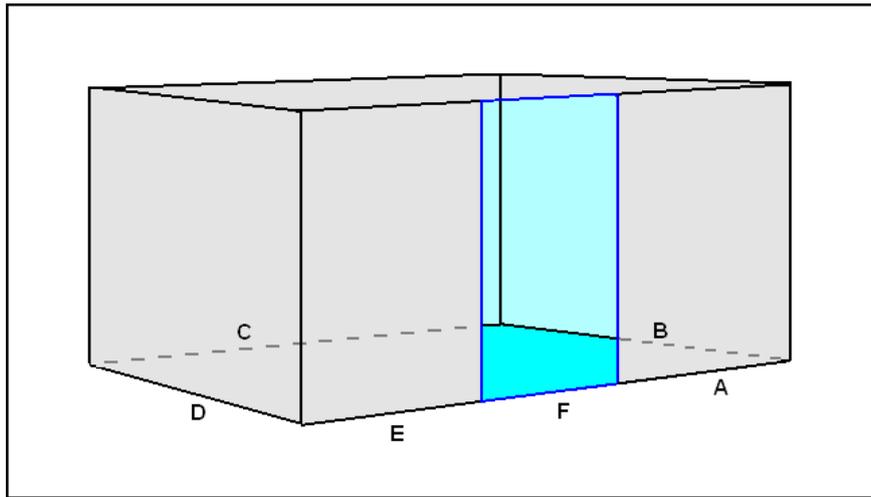


Рис. 4. Ортофрейм – модель комнаты

Одна из сторон прямоугольника, расположенная на переднем плане, состоит из трех векторов E, F и A. Векторы E и A, так же, как и B, C и D, являются основаниями для стоящих на них непроницаемых вертикальных поверхностей. Вектор F является основанием для проницаемой поверхности. Это модель свободного прохода в комнату, через который любые внешние предметы с соответствующей метрикой могут проникать свободно.

Если вместо свободного прохода у комнаты имеется Дверь, то грань на векторе F должна быть определена как условно проницаемая. Она является проницаемой только тогда, когда дверь открыта.

Двери обладают особыми геометрическими, топологическими и семантическими свойствами [23]. Существует достаточно большое, но ограниченное количество различных конструкций дверей, отличающихся своими характеристиками. Общее, что объединяет все типы дверей, – это их полустатически меняющаяся геометрия, которая меняет топологию Карты пространства.

Среди конструкций разных типов дверей есть распашные и раздвижные, одностворчатые и двустворчатые. Одностворчатая дверь может иметь петли с разных сторон. Распашные двери могут раскрываться в одну или в другую сторону. Раздвижные одностворчатые двери могут сдвигаться как в одну

сторону, так и в другую. Они могут быть спрятаны в стены, или двигаться параллельно стене с одной или с другой стороны. Все эти свойства дверей определяются параметрами полупроницаемых граней Ортофрейма. В Базе Данных Помещения имеется специальный раздел, в котором хранятся параметры со свойствами дверей [23], [24].

База Ортофрейма, его Потолок и все его боковые грани могут быть проницаемы, непроницаемы или условно проницаемы. Признак проницаемости является параметром каждой поверхности Ортофрейма.

В структуре данных каждого Ортофрейма имеются параметры, определяющие его тип, идентификатор и семантическое имя. Ортофрейм на рис. 4 по типу – образ комнаты. Идентификатором его может являться любая уникальная комбинация символов, а семантическое имя Ортофрейма – это название комнаты, например, **Столовая**.

В структуре каждого Ортофрейма имеется также группа параметров, определяющая топологические связи с другими Ортофреймами. Пара соседних Ортофреймов может содержать ссылки друг на друга, если их грани соприкасаются друг с другом. Благодаря этим ссылкам, Ортофреймы могут образовывать программно доступные сети, узлами которых являются сами Ортофреймы, а дугами – взаимные ссылки граней Ортофреймов друг на друга.

Все метрические и семантические параметры, все ссылки граней Ортофреймов друг на друга хранятся в общей Базе Данных Карты, откуда они извлекаются системой управления робота по мере необходимости.

3. Структура данных Объектов Карты

Карта операционной среды состоит из Объектов и Помещений. Объект Карты операционной среды представляет собой или один Ортофрейм или совокупность Ортофреймов, которые между собой объединены/связаны по вертикалям и горизонталям смысловых и пространственных ссылок. Предполагается, что Ортофреймы, составляющие Объект, жестко скреплены друг с другом. Их нельзя разделить, их нельзя сдвинуть друг относительно друга. А разные Объекты вместе с Ортофреймами, из которых они составлены, можно двигать друг относительно друга.

У каждого Объекта в Помещении два из векторов его Базы определяют его переднюю и заднюю стороны. Эти свойства используются для описания взаимного расположения Объектов, для определения углового положения Объектов относительно робота и их ракурса, видимого зрительной системой

робота. Заметим, что у некоторых Объектов, например обеденного стола, и у Помещений понятия передней и задней стороны отсутствуют.

В качестве примера Объекта Карты на рис. 5 представлена модель книжного стеллажа как Объекта, состоящего из пяти Ортофреймов.

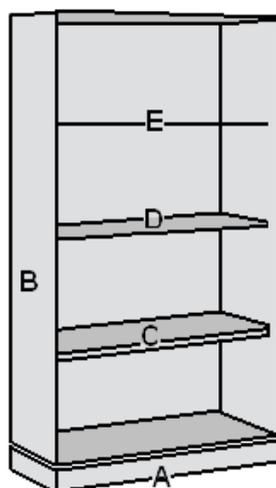


Рис. 5. Модель книжного стеллажа

Ортофрейм А является моделью основания книжного стеллажа. Два из векторов его Базы помечены, как передняя и задняя стороны. Уровень его Базы равен нулю, т.е. этот Ортофрейм находится на горизонтальной поверхности, проходящей через начало координат помещения. База представляет собой прямоугольник, все его поверхности непроницаемы.

На Потолке Ортофрейма А расположен Ортофрейм В, который является моделью корпуса книжного стеллажа. Его База в данном примере является точной копией Потолка основания стеллажа, а положение векторов Базы полностью совпадает с контуром Потолка основания А. Стеллаж открытый, передней стенки у него нет, поэтому все грани Ортофрейма В помечены как непроницаемые, кроме передней.

Ортофреймы А и В объединены в один Объект и имеют взаимные ссылки друг на друга. В структуре Ортофрейма В имеется ссылка, определяющая связь Базы Ортофрейма В с Потолком Ортофрейма А. Аналогично, в структуре Ортофрейма А имеется ссылка, которая определяют связь Потолка Ортофрейма А с Базой Ортофрейма В.

В книжном стеллаже имеются три полки. Эти полки представлены на рис. 5 Ортофреймами С, D и E. Базы этих трех Ортофреймов совершенно одинаковы. У каждого из них База представляет собой прямоугольник,

причем ширина полок меньше глубины стеллажа. В горизонтальной плоскости полки сдвинуты к задней стенке Базы Ортофрейма В.

Высота Ортофреймов D и E равна нулю, т. е. полки, абсолютно плоские, толщина их равна нулю. Отметим, что такое упрощение модели чаще всего оправдано, так как в обычных условиях толщина стенок не имеет никакого значения для системы управления движением робота или его манипулятора. Если есть необходимость придать плоской грани объем, необходимо сформировать объемный Ортофрейм. В нашем примере объемной моделью полки является Ортофрейм С.

4. Состав и структура Карты

Связывание Ортофреймов может проводиться и по боковым граням. Размеры связываемых проницаемых и условно проницаемых граней должны совпадать. Связь по непроницаемым граням просто позиционирует эти грани рядом друг рядом с другом в соответствии с их координатами.

На рис. 6 изображены Базы четырех Ортофреймов. Этот рисунок является планом Карты, который состоит из четырех комнат, примыкающих друг к другу. Модели комнат – Помещений, связаны друг с другом по проходам и дверям между комнатами, т.е. по проницаемым или условно проницаемым граням Ортофреймов. Карта как совокупность Объектов и Помещений, состоящих в свою очередь из Ортофреймов, представляет собой модель операционной среды, которая используется системой управления сервисного робота.



Рис. 6. Модель связанных друг с другом Помещений

Полная Модель операционной среды робота, как правило, содержит в себе несколько Карт, объединенных в один доменный объект – Домейн. Домейн – это группа Карт, моделирующих помещения, расположенные например, в одном здании. Каждый этаж этого здания имеет свою Карту,

каждая Карта состоит из группы Помещений. Каждое Помещение (комната, коридор, офис) наполнено мебелью и оборудованием – Объектами. Помещение вместе с Объектами, находящимися в нем, формируют Фрагмент карты. Все Объекты и Помещения состоят из Ортофреймов.

Домейн является самым крупным элементом в иерархической структуре Модели операционной среды. Домейн имеет собственный идентификатор, который является ключом для поиска в Базе Данных всех Карт, Помещений и Объектов, относящихся к Домейну. Структура иерархии элементов Модели представлена на рис. 7.

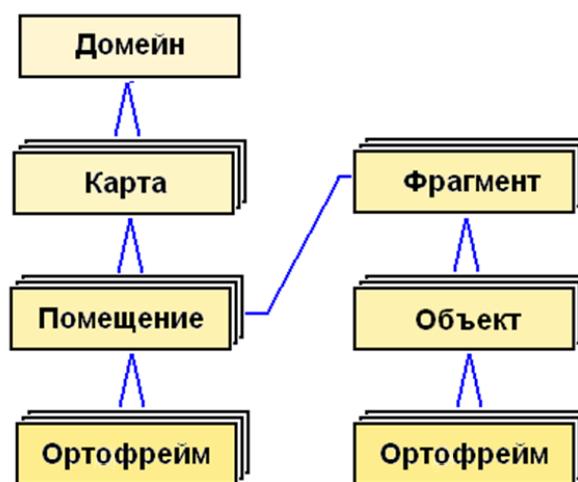


Рис. 7. Иерархия элементов Модели операционной среды

Образ реальной комнаты на Карте вместе со всеми Объектами, находящимися в этой комнате, будем называть Фрагментом Карты. Фрагмент Карты может содержать в его описании лишь описание одного Помещения только в том случае, если в этом помещении нет никаких Объектов. Фрагменты Карты имеют свои идентификаторы, которые служат ключами для их поиска в Базе Данных всех Объектов, относящихся к данному Фрагменту.

5. Семантические компоненты карты

Все Объекты и Помещения Карты каким-то образом расположены друг относительно друга. Например, книжный шкаф и письменный стол могут стоять рядом друг с другом, книжный шкаф может находиться в библиотеке, а телевизор стоять на тумбочке. Отношения взаимного положения или принадлежности между Объектами Карты являются наиболее значимыми с точки зрения системы управления робота [25].

С помощью несложных алгоритмов эти отношения выделяются из параметров Объектов и Помещений и составляющих их Ортофреймов и

хранятся в отдельных структурах Базы данных. Они используются при описании объектов, а также в процедурах планирования поведения робота.

При построении Карты относительно Баз Объектов автоматически формируются следующие их **Отношения взаимного положения**:

Объект X НАХОДИТСЯ_СВЕРХУ_НА Объекте Y
 Объект X НАХОДИТСЯ_СВЕРХУ_НАД Объектом Y
 Объект X НАХОДИТСЯ_СНИЗУ_ПОД Объектом Y
 Объект X НАХОДИТСЯ_РЯДОМ_С Объектом Y
 Объект X НАХОДИТСЯ_СБОКУ_ОТ Объекта Y
 Объект X НАХОДИТСЯ_СПРАВА_ОТ Объекта Y
 Объект X НАХОДИТСЯ_СЛЕВА_ОТ Объекта Y
 Объект X НАХОДИТСЯ_ЗА Объектом Y
 Объект X НАХОДИТСЯ_ПЕРЕД Объектом Y
 Объект X НАХОДИТСЯ_БЛИЗКО_К Объекту Y
 Объект X ПРИСЛОНЁН_К Объекту Y
 Объект X НАХОДИТСЯ_ВНУТРИ Помещения Y
 Объект X НАХОДИТСЯ_ВНЕ Помещения Y
 Помещение X СОДЕРЖИТ Объект Y
 Помещение X ИМЕЕТ_ПРОХОД_В Помещение Y
 Помещение X ИМЕЕТ_ДВЕРЬ_В Помещение Y

Для всех элементов Карты также автоматически формируются **Отношения принадлежности (часть-целое)**:

Ортофрейм X ЯВЛЯЕТСЯ_ЧАСТЬЮ Объекта Y
 Ортофрейм X ЯВЛЯЕТСЯ_НИЖНЕЙ_ЧАСТЬЮ Объекта Y
 Ортофрейм X ЯВЛЯЕТСЯ_ВЕРХНЕЙ_ЧАСТЬЮ Объекта Y
 Ортофрейм X ЯВЛЯЕТСЯ_ПЕРЕДНЕЙ_ЧАСТЬЮ Объекта Y
 Ортофрейм X ЯВЛЯЕТСЯ_ЗАДНЕЙ_ЧАСТЬЮ Объекта Y
 Ортофрейм X ЯВЛЯЕТСЯ_БОКОВОЙ_ЧАСТЬЮ Объекта Y
 Объект X СОСТОИТ_ИЗ Ортофреймов (Y,Z, ...)
 Ортофрейм X ЯВЛЯЕТСЯ_ЧАСТЬЮ Помещения Y
 Ортофрейм X ЯВЛЯЕТСЯ_НИЖНЕЙ_ЧАСТЬЮ Помещения Y
 Ортофрейм X ЯВЛЯЕТСЯ_ВЕРХНЕЙ_ЧАСТЬЮ Помещения Y
 Помещение X СОСТОИТ_ИЗ Ортофреймов (Y,Z, ...)

Существует возможность задавать вручную и хранить некоторые дополнительные характеристики в виде **Отношений – свойств элементов Карты**:

Помещение X ИМЕЕТ Свойство = Y

Объект X ИМЕЕТ Свойство = Y

Ортофрейм X ИМЕЕТ Свойство = Y

Перечень дополнительных свойств, хранимых в настоящее время в Базе Данных Карты, состоит из пяти типов: ОРИЕНТАЦИЯ (например: Горизонтальный, Вертикальный, Наклонный), СОСТОЯНИЕ (например: Закрыто, Открыто, Выдвинуто), ЦВЕТ (например: Черный, Белый, Коричневый), ОТРАЖАТЕЛЬ (например: Матовый, Зеркальный), ПОВЕРХНОСТЬ (например: Твёрдый, Мягкий, Хрупкий) и МАТЕРИАЛ (например: Дерево, Стекло, Кожа).

Приведенные отношения позволяют автоматически преобразовывать данные Карты в нужные факты для диалога с пользователем сервисного робота. Ниже приведены примеры семантических отношений, хранящихся в Базе данных Карты робота РБ-2:

Стол НАХОДИТСЯ_В Столовой

Стул НАХОДИТСЯ_СЛЕВА_У Стола

Ножка ЯВЛЯЕТСЯ_НИЖНЕЙ_ЧАСТЬЮ Табурета

Спинка ЯВЛЯЕТСЯ_ВЕРХНЕЙ_ЧАСТЬЮ Стула

Кресло ИМЕЕТ ЦВЕТ = Черный

Диван ИМЕЕТ МАТЕРИАЛ = Кожа.

6. Программное обеспечение для формирования Карты

Для формирования Карты создано программное обеспечение, с помощью которого в Базу Данных системы управления робота заносятся элементы Карты операционной среды. Весь этот процесс выполняется вручную и состоит из следующих действий:

- создание Ортофреймов;
- построение Объектов из Ортофреймов ;
- формирование Помещения;
- распределение Объектов по Фрагментам Карты.

На рис. 8 приведены примеры Объектов типа Мебель, построенных из Ортофреймов с помощью этого программного обеспечения. Эти Объекты хранятся в Базе Данных робота, их ракурсы в проекциях “фасад-профиль-план” могут быть автоматически построены и нарисованы на экране пользователя сервисного робота. Если же известны текущее положение и ориентация робота в Помещении, то также могут быть построены и видимые его датчиками ракурсы окружающих его Объектов.

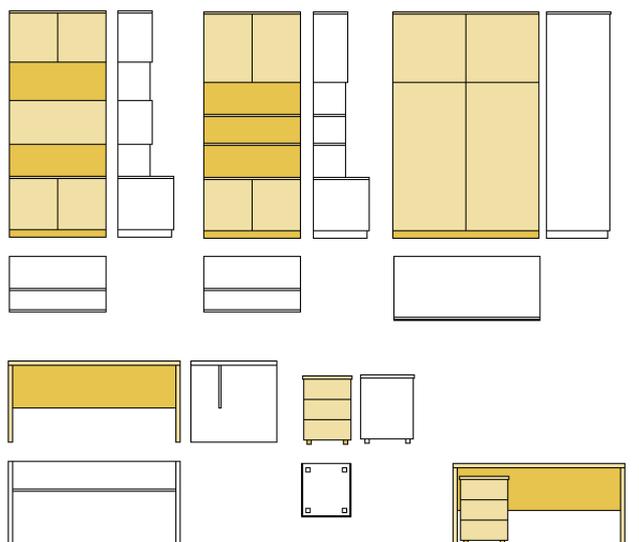


Рис. 8. Объекты типа Мебель, составленные из Ортофреймов

На рис. 8 представлены проекции “фасад-профиль-план” книжного шкафа-стеллажа, шкафа-бара, платяного шкафа, письменного стола, офисной тумбы. Отдельно в нижнем правом углу представлены письменный стол и офисная тумба так, как они должны располагаться относительно друг друга. Эти рисунки скопированы с экрана программы формирования Объектов.

На рис. 9 показан Фрагмент Карты, состоящий из Помещения Комната-В, представленного на рис. 6, и Объектов – мебели, находящейся в комнате. На левой части рисунка представлены Базы всех Объектов мебели, на правой части – Базы наиболее габаритных Ортофреймов, входящих в состав этих Объектов. Этот рисунок представляет собой реальный Фрагмент тестового Помещения, которое занесено в Базу Данных робота.

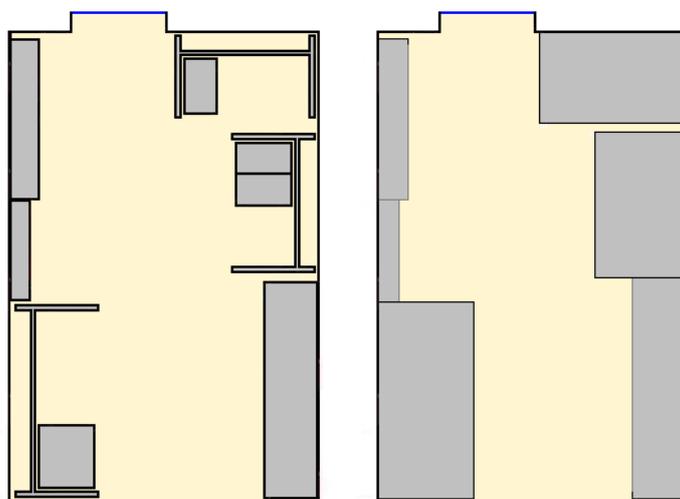


Рис. 9. Фрагмент Карты

Необходимо подчеркнуть, что Ортофреймы, Объекты, Помещения, Фрагменты, Карта – все эти понятия в программно-информационном комплексе системы управления робота РБ-2 структурно реализованы в виде соответствующих классов и алгоритмов их методов.

7. Построение рабочей области маршрута движения

Приведем пример использования Карты, составленной из Ортофреймов, для решения одной из основных задач системы управления сервисным роботом: построения маршрута его движения в заданное на карте место Помещения.

Моделью горизонтальной плоскости пола Помещения является план помещения, т.е. База соответствующего Ортофрейма. На ней расположены Базы всех Объектов, стоящих на полу этого помещения. Для системы управления робота эти Объекты являются препятствиями движению. Они должны быть исключены из рабочей области робота при планировании маршрута его движения.

Кроме того, Объекты в реальном пространстве помещения могут находиться на некотором небольшом расстоянии друг от друга. Реальный робот, имеющий линейные размеры больше этого расстояния, физически не может попасть в это пространство, поэтому для него это мертвые зоны. Это пространство также должно быть исключено из рабочей области для планирования маршрута движения. На рис. 10 слева мертвые зоны Фрагмента Карты закрашены красным цветом.

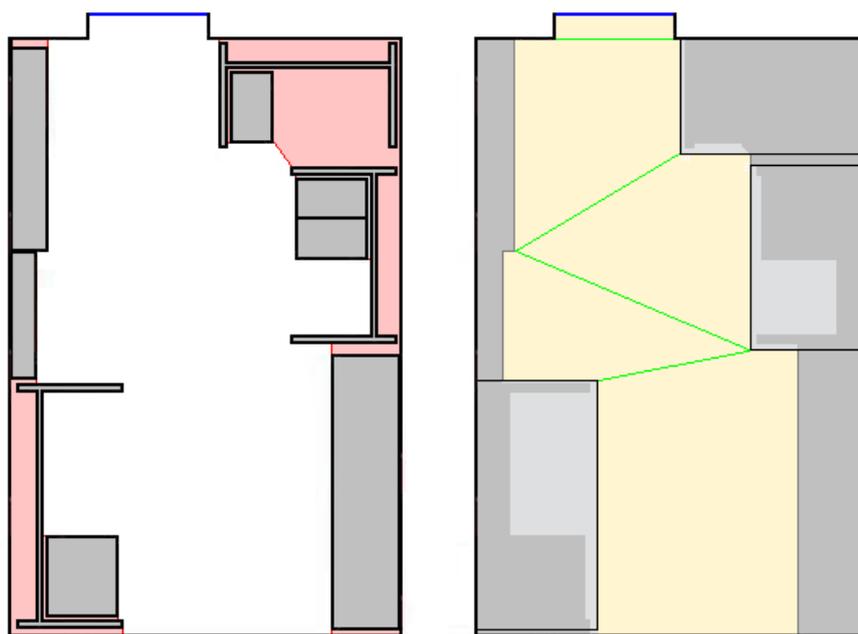


Рис. 10. Построение рабочей поверхности перемещения робота

Кроме того, надо учитывать высоту самого робота с манипулятором, даже сложенным в транспортном положении. Необходимо учитывать Объекты, у которых имеются выступающие детали до уровня высоты самого робота. Для этого последовательно рассматриваются все Объекты в данной комнате, Базы Ортофреймов которых находятся на уровнях ниже высоты самого робота. Контуры Баз таких Ортофреймов исключаются из плоскости рабочей поверхности пола. На рис. 10 справа Базы таких Ортофреймов закрашены светло-серым цветом.

Итак, область возможного перемещения робота по поверхности пола определяется как База Ортофрейма Комнаты минус мертвые зоны, минус Базы всех Ортофреймов объектов в этом помещении, находящихся от уровня пола до высоты самого робота с манипулятором.

Например, ограничения на зону движения могут возникать из-за одной центральной ножки стола с подставкой, через которую переезжать роботу нельзя, или от четырех ножек стула или табурета, поскольку расстояние между их ножками меньше, чем ширина робота. Столешница стола, расположенная на уровне ниже высоты робота, также является препятствием и ограничивает пространство движения робота.

Следует учитывать также, что и на горизонтальной плоскости пола комнаты может существовать ступенька вниз или вверх, которая может быть непреодолима для робота. Вся База Ортофрейма, моделирующего поверхность пола после ступеньки также должна быть исключена из пространства движения робота.

Оставшаяся в качестве рабочей поверхности часть пола Помещения разбивается на множество смежных Пассфреймов [1], которые используются для планирования маршрута движения робота. Пассфреймы – это плоские выпуклые многоугольники, отделенные друг от друга отрезками, которые робот может пересекать. На рис. 10 справа Пассфреймы отделены друг от друга зелеными линиями.

По своей структуре Пассфрейм ничем не отличается от Базы Ортофрейма. Единственное различие – форма. Пассфрейм – это всегда выпуклый многоугольник, а База Ортофрейма – это многоугольник любой формы. Так же, как и База Ортофрейма, Пассфрейм – это замкнутый многоугольник на горизонтальной плоскости, ограниченный массивом векторов в собственной системе координат Базы Помещения.

Каждому вектору Пассфрейма присваивается группа параметров, определяющих проницаемость, топологические связи с другими

Пассфреймами, маркеры типа и семантические имена данного вектора. Проницаемость и семантические имена векторов наследуются Пассфреймом у боковых граней Ортофреймов Объектов, которые ограничивают Пассфрейм.

Каждый Пассфрейм обладает идентификатором, уникальным в рамках своего Фрагмента Карты. Ему также присваивается один из маркеров-типов, например: "Проход", "Граница видимости", "Закрытая зона", "Тупик".

8. Применение Карты для планирования движения

Рассмотрим работу системы управления в процессе выполнения команд движения. Предположим, что человек (оператор) задает роботу задание: "Принести лекарство". В данной публикации не будем углубляться в процедуру ввода этого задания в систему и в процесс его первичной обработки. Важно только отметить, что все эти операции происходят с использованием запросов к Базе данных, которые исполняются путем обработки семантической информации Карты.

В результате система формирует план действий робота, где заведомо присутствуют этапы, которые требуют определить позицию робота в текущий момент, а также переместиться к Объекту Карты, содержащему лекарство, и обратно – к человеку, определившему задание. На примере действий по перемещению робота в пространстве продемонстрируем использование описанной выше Карты системой управления.

Рассмотрим этап плана действий робота, в котором робот должен Переместиться к Объекту С, на котором находится лекарство. Для выполнения данного этапа используются все три типа моделей, заложенные в структуру Карты: и семантическая, и топологическая, и координатная.

На первом шаге семантическое описание операционной среды используется логическо-декларативным блоком системы управления. В нашей реализации в качестве языка описания используется синтаксически видоизмененная русифицированная версия языка STRIPS [26], которая обеспечивает возможность дедуктивного логического преобразования семантических формул.

Предположим, что система управления робота определила координаты текущей позиции робота [3], [27], [28] на Карте, представленной на рис. 6. Кроме собственно координат робота, навигационный блок робота РБ-2, распознает Помещение, в котором находится робот, например, Комната-В, и присваивает некоторое семантическое имя позиции, в которой находится робот, например, "Точка-А". Эта семантическая информация для логическо-

декларативного блока системы управления является исходной позицией робота.

Исходная позиция:

РОБОТ-НАХОДИТСЯ-В-ПОЗИЦИИ_(Точка-А)
ПОЗИЦИЯ_НАХОДИТСЯ-В_(Точка-А, Комната-В)

Предполагаем, что системой управления из Карты получена информация о местонахождении лекарства в Точке-К на Объекте, который находится в Комнате-У. Эта информация является целевой позицией робота на данном этапе.

Целевая позиция:

РОБОТ-НАХОДИТСЯ-В-ПОЗИЦИИ_(Точка-К)
ПОЗИЦИЯ_НАХОДИТСЯ-В_(Точка-К, Комната-У)

Информацию об исходной и целевой позиции робота дополняют факты и предположения, входящие в семантическое описание операционной среды, и хранящиеся в Базе Данных.

Факты:

ДВЕРЬ_НАХОДИТСЯ-В_(Дверь-ВZ, Комната-В)
ДВЕРЬ_НАХОДИТСЯ-В_(Дверь-ZY, Комната-Z)

Предположения:

ДВЕРЬ_ИЗ_В_ОТКРЫТА(Дверь-ВZ, Комната-В, Комната-Z)
ДВЕРЬ_ИЗ_В_ОТКРЫТА(Дверь-ZY, Комната-Z, Комната-У)

Для обработки этой информации в Базе Данных робота содержится набор декларативных правил вида:

Действие: Движение-в_от-двери_до-места

(Параметры: помещение ?x, дверь ?y, место ?z)

(Предусловие:

РОБОТ-НАХОДИТСЯ-В_(помещение ?x)

РОБОТ-НАХОДИТСЯ-У-ДВЕРИ_(дверь ?y)

ПОЗИЦИЯ_НАХОДИТСЯ-В_(место ?z, помещение ?x)

ДВЕРЬ_НАХОДИТСЯ-В_(дверь ?y, помещение ?x))

(Эффект+: РОБОТ-НАХОДИТСЯ-В-ПОЗИЦИИ_(место ?z))

(Эффект-: РОБОТ-НАХОДИТСЯ-У-ДВЕРИ_(дверь ?y)))

Для построения логического вывода реализован классический алгоритм Графплан [29]. Выше приведены не все факты, предположения, правила, которые реально используются для решения поставленной задачи. Это

только пример. На самом деле, для решения такой задачи используется около двадцати правил, фактов и предположений. В результате работы алгоритма Графплан логическо-декларативный блок системы управления роботом создает следующий набор директив:

Движение-в_от-места_до-двери_(Комната-В, Точка-А, Дверь-BZ)
 Движение-из_в_через-дверь_(Комната-В, Комната-Z, Дверь-BZ)
 Движение-в_от-двери_до-двери_(Комната-Z, Дверь-BZ, Дверь-ZY)
 Движение-из_в_через-дверь_(Комната-Z, Комната-У, Дверь-ZY)
 Движение-в_от-двери_до-места_(Комната-У, Дверь-ZY, Точка-К)

На рис. 11 приведена графическая интерпретация этого набора директив как последовательности действий, которую должен выполнить робот для того, чтобы переместиться из Точки-А к Точке-К.

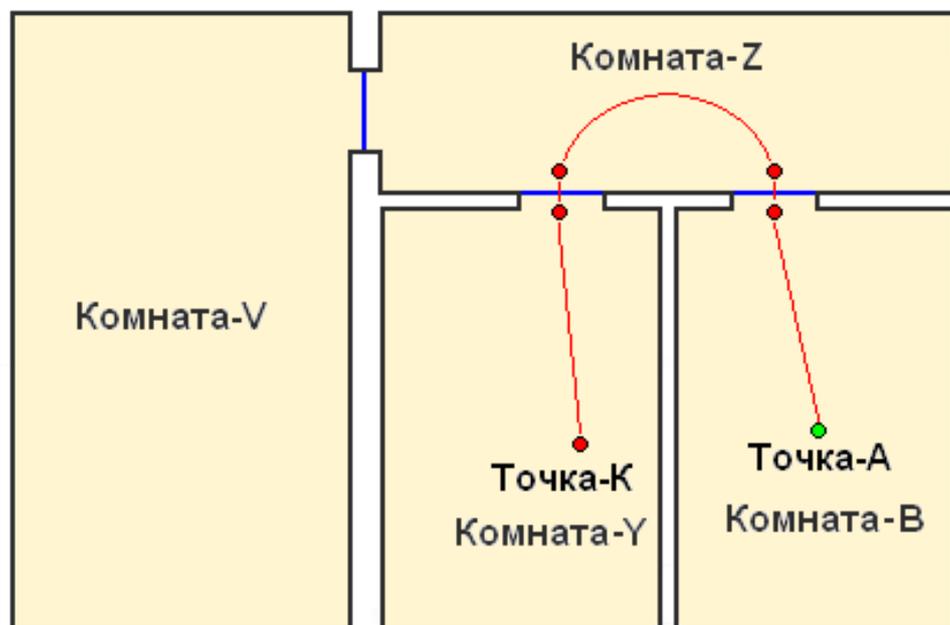


Рис. 11. Последовательности действий для перемещения из Точки-А к Точке-К

На втором шаге эти директивы последовательно передаются на топологический уровень, где формируется маршрут движения робота. Рассмотрим работу топологического уровня на примере обработки первой директивы:

Движение-в_от-места_до-двери_(Комната-В, Точка-А, Дверь-BZ)

Для этого используются Пассфреймы, являющиеся элементами Карты, хранящимися в Базе Данных, причем из Базы Данных выбираются только Пассфреймы, относящиеся к данному одному Фрагменту Карты. На рис. 12 слева представлены Пассфреймы, связанные с этим Фрагментом Карты, с

Комнатой-В. Алгоритм формирования этого массива Пассфреймов описан в предыдущем разделе.

Алгоритм формирования маршрута движения сводится к задаче формирования цепочки Пассфреймов от начального к целевому. В структуре Пассфреймов, как уже указывалось выше, содержатся ссылки на соседние Пассфреймы, благодаря которым они все образуют сеть.

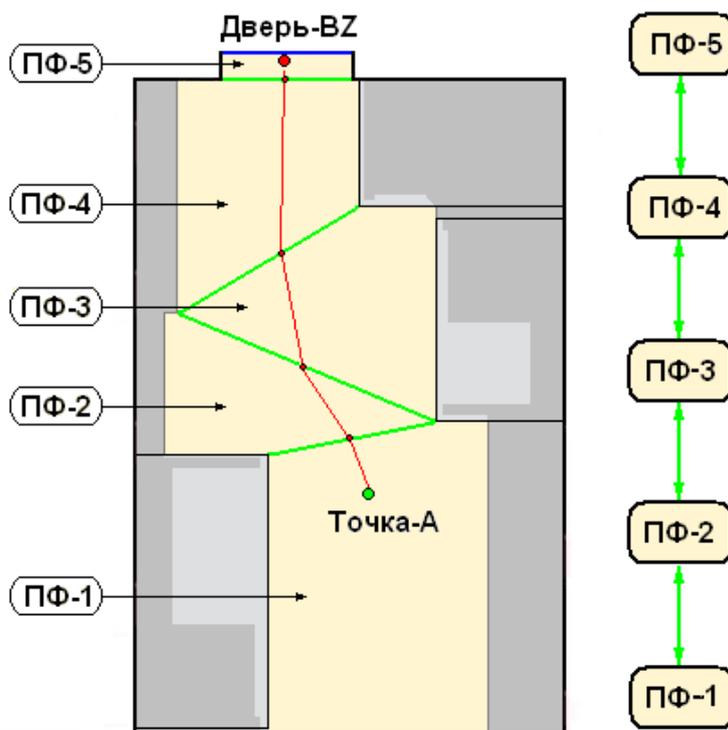


Рис. 12. Сеть Пассфреймов в Комнате-В

Построение маршрута начинается с того, что идентифицируется Пассфрейм, в контуре которого находится Точка-А, для которого положение этой точки является внутренней точкой. Этот Пассфрейм назначается исходным узлом. С него начинается поиск в сети цепочки узлов к целевому Пассфрейму. Дверь-BZ используется для выбора целевого узла сети. Выбирается Пассфрейм, одна из границ которого является дверью с идентификатором Дверь-BZ.

На рис. 12 справа изображена сеть Пассфреймов, сформированная для Помещения Комната-В. В данном примере она предельно проста. В условиях реальной городской квартиры такие сети Пассфреймов, как правило, достаточно просты. В больших помещениях, например, в зале на выставке с большим количеством Объектов, расставленных не только вдоль стен, сети Пассфреймов могут иметь до 40-50 узлов с десятком боковых ветвей.

Задача формирования маршрута решается методом прямого перебора узлов сети в глубину с возвратами и с проверкой на цикличность. Для каждого уже выбранного узла сети выбирается соседний узел – Пассфрейм, имеющий общую границу с предыдущим Пассфреймом, через который робот может пройти. Отрезок, граница между этими Пассфреймами, определяет очередную подцель маршрута движения. Процесс перебора завершается, когда на очередном шаге будет выбран целевой узел. Результатом работы алгоритма является упорядоченная цепочка Пассфреймов, которая и является маршрутом движения по сети из исходного узла в целевой узел.

На третьем шаге формируется координатный маршрут движения, и здесь используется метрическая часть Карты. Координатный маршрут строится из отрезков прямых, проходящих через все Пассфреймы в цепочке выбранного маршрута. Эти отрезки соединяют последовательно, от предыдущего Пассфрейма к следующему, координаты средних точек отрезков, разделяющие Пассфреймы в цепочке маршрута движения. На этом и заканчивается подготовка к выполнению данной директивы. Последовательность координат подцелей передается соответствующим системам робота на исполнение.

Данный пример относится только к планированию движения робота. Процедура формирования полного плана действий робота здесь не рассматривалась. В реальности структура Карты такова, что с помощью того же механизма построения логическо-декларативных решений она может использоваться и для формирования полного плана [30]. Этот же механизм может использоваться для взаимодействия робота с человеком. Например, определив свое координатное местоположение, робот может преобразовать его в семантическую форму и сформулировать в виде, понятном человеку-оператору. Например:

Я нахожусь в Комнате-В у двери, ведущей из Комнаты-В в Комнату-Z.

Аналогично команды, поступающие от человека, могут преобразовываться в информацию, доступную для обработки ее системой управления робота.

9. Отличие Карты от Оперативной модели

В проекте робота РБ-2 используются модели двух типов: Статическая модель – Карта и несколько Оперативных моделей для разных задач. У Оперативных моделей есть особенности, связанные с методами их построения и применения.

Содержание Оперативных моделей аналогично содержанию Карты. Каждая Оперативная модель также содержит в себе метрическую информацию, данные о топологических связях между элементами, а также семантические метки, описывающие тип, назначение и название каждого элемента. Однако Оперативная модель гораздо проще, чем Карта.

В отличие от Карты, которая создается фактически один раз в ходе специальной процедуры знакомства с операционной средой, Оперативная модель формируется/обновляется системой управления робота постоянно в процессе его функционирования, с периодичностью, достаточной для успешного реагирования на изменения в операционной среде.

Оперативная модель охватывает не все пространство функционирования робота, а только часть среды вокруг робота. Число элементов в ней определяется, прежде всего, возможностями сенсоров, на базе которых строится модель. Система управления создает ее только для решения текущей задачи оперативного управления роботом, при этом точность этой модели значительно выше точности Карты.

Каждая Оперативная модель и Карта совместимы друг с другом. Например, основным строительным элементом Карты является Ортофрейм, а основным строительным элементом Оперативной модели, используемой для управления движения корпуса робота, является Пассфрейм, структура которого полностью идентична структуре Базы Ортофрейма.

С точки зрения метрического описания, карта является грубой моделью Операционной среды робота, ее погрешность в некоторых случаях в Базе Данных робота РБ-2 может достигать 20 см. Оперативная модель значительно точнее, так как именно она используется для оперативного управления роботом. Погрешность этой модели связана с возможностями сенсоров, на базе которых строится модель. У робота РБ-2 погрешности Оперативных моделей не превышают 1%.

Карта используется системой управления робота совместно с Оперативной моделью, например, для определения положения робота, или для идентификации топологии окружающей среды, а также и для корректировки самой Оперативной модели.

Заключение

Необходимо еще раз подчеркнуть, что описываемая модель, Карта, создавалась под конкретное приложение – под мобильного сервисного робота. Для этих целей свойства данной модели вполне приемлемы. Однако есть приложения, для которых есть смысл создавать метрически более точные модели среды или отдельных её элементов. Например, для робота, изготавливающего детали мебели, который должен с высокой точностью отличать гнутую ножку кресла от прямой ножки.

Для этого возможно уточнение Карты за счет создания дополнительных метрических моделей, которые можно запоминать в Базе Данных и связывать их с Ортофреймовыми моделями системой ссылок на соответствующие таблицы. Например, некоторые детали объектов, мебели или предметов интерьера можно с достаточной точностью моделировать призмой или пирамидой. Для таких объектов можно дополнительно использовать модель **Унифрейм**, которая очень похожа на Ортофрейм, но у которой Потолок как геометрическая фигура соответствует Базе, но размеры сторон фигуры Потолка отличаются от размеров сторон фигуры Базы.

Унифрейм – это расширение понятие Ортофрейма с не обязательно вертикальными гранями. С помощью комбинации Унифреймов вместе с Ортофреймами можно с высокой точностью описывать большинство объектов, окружающих людей в помещениях. Структура Базы Данных позволяет вводить таблицы с информацией о структурах любого типа и связывать их с существующими Объектами системой ссылок. Однако геометрические расчеты для моделей с Унифреймами значительно сложнее, чем с Ортофреймами, да и система управления роботом должна быть дополнена программами обработки таких моделей, а также соответствующими запросами к Базе Данных.

Не все объекты, окружающие человека в помещениях, можно и нужно описывать с помощью Ортофреймов и Унифреймов. В Базе Данных робота должно находиться множество и других типов моделей, образов предметов, окружающих людей в помещениях. Как правило, это небольшие предметы, которые являются объектами работы манипулятора. Для каждого типа таких предметов должны создаваться свои модели, позволяющие роботу идентифицировать их и оперировать с ними.

Список литературы

1. Давыдов О.И., Платонов А.К. Сеть Пассфреймов – комбинированная Модель операционной среды мобильного робота. // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. № 15. 28 с.
2. Давыдов О.И., Платонов А.К. Алгоритм управления дифференциальным приводом мобильного робота РБ-2. // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. № 25. 17 с.
3. Давыдов О.И., Платонов А.К. Метод определения позиции и ориентации мобильного робота с лазерным сканером. // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. № 45. 20 с.
4. International Federation of Robotics (IFR). <http://www.ifr.org>
5. Ворожцов А.В. Критерии интеллектуальности искусственных систем. // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2004. № 60. 26 с.
6. Care-O-bot. <http://www.care-o-bot-4.de>
7. Daya Robotics. <http://dayarobotics.dayaint.com>
8. PAL Robotics. <http://pal-robotics.com>
9. MetraLabs Robotics. <http://www.metralabs.com>
10. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Пряничников В.Е. Методика моделирования робота, перемещающегося в пространственной среде. // Изв. АН СССР, сер. ТК, 1980, № 1, с.46-54
11. Носков. В.П., Рубцов И.В., Романов А.Ю. Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальногомера. // Мехатроника, автоматизация, управление, 2007 №8. М.: Из-во «Новые технологии», с. 2-5.
12. Евсеев А.А., Носков В.П., Платонов А.К. Формирование электронной карты при автономном движении в индустриальной среде. // Мехатроника, автоматизация, управление, 2008, №2. М.: Из-во «Новые технологии», с. 41-45.
13. Thrun S. Learning Occupancy Grid Maps with Forward Sensor Models. //Autonomous Robots, Volume 15, Issue 2, September 2003, pp. 111-127.
14. Huang W. H., Beevers K. R. Topological Mapping with Sensing-limited Robots. //In Proc. of the 6th International Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics (WAFR 2004), Utrecht, 2004, pp. 367-382.
15. Thrun S., Bucken A. Integrating Grid-Based and Topological Maps for Mobile Robot Navigation. //In Proc. of the Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence, AAAI Press, Portland, 1996, pp. 944-950.

16. Платонов А.К. Задача «полуслепого инерционного коммивояжера». //Материалы НШК "Мобильные роботы и мехатронные системы", МГУ, Москва, 2001, с. 94-108.
17. Галактионов В.А., Мусатов А.М., Мансурова О.Ю., Ёлкин С.В., Клышинский Э.С., Максимов В.Ю., Аминова С.Н., Мусаева Т.Н. Система машинного перевода «Кросслятор 2.0» и анализ ее функциональности для задачи трансляции знаний. // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2007. № 89. 27 с.
18. Гаврилов С.В., Кирильченко А.А., Кугушев Е.И., Платонов А.К. Программный комплекс для создания и анализа семантических сетей, описывающих системы понятий. // Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР, №140, Москва, 1986, 28 с.
19. Nuchter A., Hertzberg J. Towards Semantic Maps for Mobile Robots. //Robotics and Autonomous Systems, vol. 56, no. 11, Nov. 2008, pp. 915–926.
20. Платонов А.К., Кирильченко А.А., Пряничников В.Е. Степанов Ю.И., Трубицин О.Н. Экспертная поддержка систем управления мобильными роботами // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 1996. № 57. 32 с.
21. Лакота Н.А., Носков В.П., Рубцов И.В., Лундгрэн Я.-О., Моор Ф. Опыт использования элементов искусственного интеллекта в системе управления цехового транспортного робота. // Мехатроника, 2000, №4. М.: Из-во «Новые технологии», с. 44-47.
22. Suguru Ikeda, Jun Miura. 3D Indoor Environment Modeling by a Mobile Robot with Omnidirectional Stereo and Laser Range Finder. // In Proc. of 2006 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Beijing, 2006, pp. 3435-3440.
23. Anguelov D., Koller D., Parker E., Thrun S. Detecting and modeling doors with mobile robots. //In Proc. of the IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA), 2004, pp, 3777 - 3784.
24. Ruhr T., Sturm J., Pangercic D., Cremers D., Beetz M. A Generalized Framework for Opening Doors and Drawers in Kitchen Environments. // In Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), St. Paul, 2012, pp. 3852-3858.
25. Blodow N., Goron L. C., Marton Z.-C., Pangercic D., Ruhr T., Tenorth M., Beetz M. Autonomous Semantic Mapping for Robots Performing Everyday Manipulation Tasks in Kitchen Environments. // In Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), San Francisco, 2011, pp. 4263-4270
26. Lifschitz V. On the Semantics of STRIPS. // Reasoning about Actions and

Plans. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1987, pp. 1–9.

27. Носков А.В., Носков В.П. Распознавание ориентиров в дальнометрических изображениях. // Сборник «Мобильные роботы и мехатронные системы». Из-во МГУ, Москва, 2001. с. 179-192.
28. Носков В.П., Носков А.В. Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям. // Мехатроника, автоматизация, управление, 2005, №12. М.: Из-во «Новые технологии», с. 16-21.
29. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: Современный подход. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006, с. 541-545.
30. Kunze L., Tenorth M., Beetz M. Putting People's Common Sense into Knowledge Bases of Household Robots. // In Proc. of the Annual German Conference on Artificial Intelligence (KI2010). Karlsruhe, Springer, 2010, pp. 151–159.