

УДК 004:681.5

Н. И. ЮСУПОВА, Х. ВЁРН, И. Р. МАМАЕВ

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОНТЕЙНЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ PMD

Рассматривается проблема решения задачи извлечения объектов из контейнера с использованием манипулятора, анализируются особенности технологии Photo Mixer Device и обосновываются преимущества ее применения. Также рассматриваются особенности расчета стратегий захвата и планирования движения манипулятора, описывается разработанный программно-аппаратный комплекс. *Извлечение объектов; PMD; робот; стратегия захвата; планирование траектории*

Несмотря на десятилетия исследований в области компьютерной графики, робототехники и автоматизации производства, задача извлечения объектов из контейнера остается открытой. В современном производстве эта, на первый взгляд, легкая задача решается с помощью сложных производственных линий зачастую с применением ручного труда. Количество вложений и затрат, связанных с существующими решениями, показывает необходимость разработки новых подходов к решению задачи извлечения объектов из контейнера.

Данная задача напрямую зависит от аппаратной части, в особенности от сенсорной подсистемы. Последнее время наиболее популярны решения, основанные на использовании стереокамер [1, 3] и лазерных дальномеров [2]. Но существующие технологии и соответствующие методы обладают определенными недостатками. В статье предлагается подход, позволяющий использовать преимущества новейшей технологии Photo Mixer Device (PMD) и компенсировать ее недостатки.

На базе предложенного подхода разработан программно-аппаратный комплекс для решения задачи извлечения объектов из контейнера с помощью манипулятора. В процессе реализации методов большое внимание было уделено архитектуре программного обеспечения, чему посвящен отдельный раздел статьи.

Таким образом, можно выделить следующие особенности предлагаемого подхода:

- используются сенсоры с новой технологией Photo Mixer Device (PMD), которая позволяет получать 3-мерное изображение в реальном времени;
- представлены методы реконструкции сцены по данным с PMD-камеры, которые позволяют существенно сократить время и сложность вычислений;
- разработаны оптимизированная стратегия захвата объектов и адаптированные методы планирования пути манипулятора.

Следует отметить, что в данной статье не рассматривается проблема распознавания объектов и основной акцент сделан на проектировании всей системы в целом, особенностях использования технологии PMD, а также на реализации управления манипулятором в рамках поставленной задачи. В первом разделе будет представлена общая постановка задачи, далее будет рассмотрена технология PMD. Архитектура ПО описана в 3-м разделе. В заключении представлены результаты исследований и направления дальнейших исследований.

1. ЗАДАЧА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ИЗ КОНТЕЙНЕРА

Задача извлечения объектов из контейнера является хорошо известной проблемой в области робототехники. В последнее время было разработано много решений на базе 2-х и 3-мерного зрения [3]. Но, несмотря на это, существует несколько проблем, которые могут быть решены более эффективно с использованием

Контактная информация: +79173472220

Работа выполнена в рамках проекта «Lynkeus» при поддержке гранта 16SV2307 Федерального Министрства Образования и Исследований Германии (Bundesministerium für Bildung und Forschung)

новейшей технологии PMD, например, точная и быстрая реконструкция сцены. Основная особенность этой технологии, которая помогает увеличить эффективность системы, – это возможность получать одновременно 3-мерные изображения в реальном времени.

В задаче извлечения объектов из контейнера можно выделить следующие подзадачи [4]:

- 3-мерная реконструкция сцены;
- анализ сцены:
 - распознавание объекта;
 - локализация объекта;
- расчет точек захвата;
- разработка стратегии захвата;
- планирование пути.

Система, позволяющая решать поставленные подзадачи, состоит как из программных модулей, так и из аппаратных средств. Следует отметить особую важность сенсоров среди остальных аппаратных модулей, так как от выбора сенсорной системы зависит скорость и точность 3-мерной реконструкции сцены, что влияет на анализ сцены и процессы планирования траектории робота.

Сенсорные системы можно классифицировать на 2-мерные и 3-мерные. 2-мерные основаны на черно-белых или цветных монокулярных камерах, 3-мерные – на лазерных дальномерах, стереокамерах, триангуляции и т. д. [1, 2, 3]. Однако все эти системы имеют определенные недостатки [5, 6]:

- зависимость от условий освещения, цвета и отражающих свойств объектов (монокулярные и стереокамеры);
- недостаточная скорость получения изображения (лазерные дальномеры);
- высокая сложность и медленная скорость 3-мерной реконструкции сцены (стереокамеры);
- высокая стоимость;
- большие размеры.

В последние годы был разработан новый метод получения 3-мерных изображений в реальном времени – PMD, особенности которого позволяют повысить эффективность решения рассматриваемой задачи.

2. ТЕХНОЛОГИЯ PHOTO MIXER DEVICE (PMD)

Уже несколько десятилетий исследуются системы 3-мерного зрения. В последнее время слияние классических методов с новыми технологиями привело к появлению 3-мерных систем с радикально улучшенными характеристиками. Один из таких многообещающих

подходов, позволяющий определять расстояние до объектов за счет измерения времени, которое затрачивает луч на путь от источника до объекта и обратно, основан на PMD технологии.



Рис. 1. PMD-камера

Для исследования сцены PMD-камера испускает свет в ИК диапазоне, используя светодиоды с частотой модуляции 20 МГц, и измеряет время прохода луча туда и обратно используя специальный сенсорный элемент. Таким образом, каждый пиксель PMD-сенсора может измерять сдвиг фазы модулированного света и получать 3-мерные данные. Более детальное описание можно найти в [7, 8].

Сделанная на базе описанного метода PMD-камера ifm o3d100 (рис. 1) позволяет получать 3-мерные снимки с разрешением до 50×64 пикселей и частотой кадров до 25 Hz. Такие камеры позволяют получать как изображение интенсивности (рис. 2), так и данные о расстоянии до объектов до 7,5 метров [8] (рис. 2) с каждого пикселя.

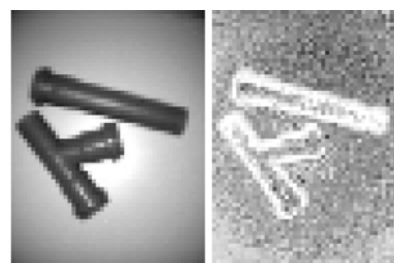


Рис. 2. Изображения интенсивности и удаленности

В сравнении с другими, PMD – очень компактная система, которая позволяет получать данные в реальном времени и, благодаря использованию собственных источников света и автоматическому подавлению фонового света, не зависит от условий освещенности.

Однако существуют и недостатки, компенсация которых реализована в программном обеспечении:

- маленькое разрешение и угол обзора камеры, что осложняет 3-мерную реконструкцию сцены и распознавание объектов. Для решения подобных проблем реализована возможность реконструкции сцены по нескольким снимкам;

- искажения и ошибки измерения расстояния: для коррекции ошибок и помех при получении данных с камеры проводится предварительная калибровка;

- шум на снимках: используются шумоподавляющие фильтры [9].

Таким образом, слабые стороны PMD технологии компенсируются с помощью программных средств, а ее преимущества, такие как возможность получения 3-мерного изображения в реальном времени, позволяют выполнить надежную и быструю реконструкцию сцены. Исчезает необходимость использования сложных вычислений для расчета сцены.

2.1. Реконструкция сцены по данным PMD

Алгоритм может быть реализован следующим способом (рис. 3).

1. Данные о расстоянии трансформируются в 3-мерные модели относительно системы координат камеры, т. е. каждый пиксель с информацией о расстоянии (p_{img}) трансформируется в точку в пространстве координат камеры (p_{camera}), используя матрицу проекции (M_{proj}):

$$p_{img} = M_{proj} \cdot p_{camera}, \quad (1)$$

$$\lambda \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} u = \frac{f_x x + s y + c_x z}{z} \\ v = \frac{f_y y + c_y z}{z} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{(u - c_x)z}{f_x} - y \\ y = \frac{(u - c_y)z}{f_y} \end{cases}, \quad (3)$$

где λ – вектор скалирования; f_x, f_y – фокальные расстояния по x и по y ; c_x, c_y – центр изображения; u, v – координаты точки в пикселях; x, y, z – координаты точки в 3-мерном пространстве.

2. Трехмерные модели трансформируются относительно мировой системы координат:

$$p_{world} = {}^{world}T_{TCP} \cdot {}^{TCP}T_{camera} \cdot p_{camera}, \quad (4)$$

где ${}^{TCP}T_{camera}$ – трансформационная матрица из системы координат камеры в систему коор-

динат центра рабочего инструмента манипулятора (матрица может быть вычислена при помощи калибровки «рука–камера»); ${}^{world}T_{TCP}$ – трансформационная матрица из системы координат центра рабочего инструмента в мировые координаты (матрица может быть вычислена из текущего положения робота).

3. С помощью триангуляции Делоне вычисляется полигональная модель на базе 3-мерной воксельной модели и сглаживается по Лапласу.



Рис. 3. Алгоритм реконструкции сцены

2.2. Стратегия захвата и особенности планирования траектории движения робота

Полученная после обработки PMD данных полигональная модель позволяет быстро распознать объекты, находящиеся в контейнере. Для оптимизации расчета захвата вместо детального распознавания всей кучи объектов идет лишь поиск областей объектов, позволяющих осуществить захват. Далее выбирается объект, который находится выше и не имеет наложений с другими объектами или имеет их минимальное количество. Захват производится с учетом ориентации объекта в пространстве, что позволяет более точно и аккуратно брать объекты из контейнера.

С точки зрения планирования траектории робота в задаче извлечения объектов из контейнера можно выделить 2 типа движения: движение среди статических объектов и среди динамических. Виртуальная сцена моделируется из загружаемой статической сцены и динамических данных с PMD-камеры. С целью оптимизации процесса планирования можно рассматривать стадию захвата объектов отдельно и только для нее вычислять новую тра-

екторию в каждой итерации с учетом изменения количества и расположения объектов в контейнере. Траектория движения манипулятора среди статических элементов вычисляется только один раз в начале процесса на базе виртуальной статической модели. Такой подход позволяет существенно сократить время планирования траектории движения робота за счет выделения динамических областей на виртуальной сцене и планирования в ограниченном пространстве.

3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Одной из целей исследования была разработка гибкого программного обеспечения, которое позволит не только решать поставленную задачу, но и проводить сравнения и тестирования разных алгоритмов и методов, например, алгоритмов планирования пути манипулятора.

Система состоит из основного модуля, который обеспечивает управление сетевой коммуникацией, обрабатывает XML-сообщения от модулей с учетом правил доступа к ресурсам, хранит настройки и т. д.; а также модулей:

- управления роботом: позволяет управлять роботами, используя разработанные интерфейсы и XIRP-протокол;
- управления PMD-камерой: позволяет получать и сохранять данные от PMD-камеры, осуществляет настройку параметров камеры;
- моделирования: делает реконструкцию сцены, строит воксельную и полигональную модели;
- распознавания объектов: распознает объекты и вычисляет их положение в пространстве;
- калибровки камеры: проводит автоматизированную латеральную калибровку, калибровку системы «рука–камера» и калибровку дальномера PMD-камеры;
- планирования траектории: вычисляет траекторию робота с учетом препятствий;
- захвата: планирует стратегию захвата объектов с учетом взаиморасположения объектов и управляет механическим захватом;
- расчета точек захвата: рассчитывает точки захвата для извлекаемого объекта.

Связь между модулями организована с помощью протокола, основанного на языке XML. На рис. 4 показана XML-схема сообщения.

Пример XML-сообщения:

```
<LynkeusNetMessage>
<Source>
ENVIRONMENT_MODELING_MODULE
```

```
</Source>
<Destination>
PMD_CAMERA_CONTROL_MODULE
</Destination>
<Message>GET_IMAGE</Message>
<Param>
<Name>ImageType</Name>
<Value>Depth</Value>
</Param>
</LynkeusNetMessage>
```

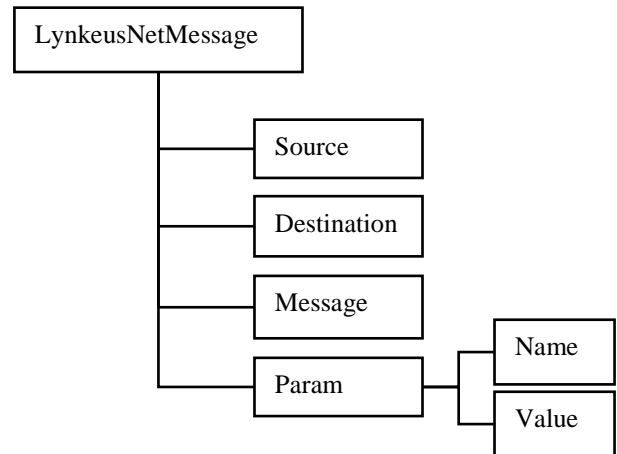


Рис. 4. XML-схема сообщения

Каждый модуль системы реализован как отдельный процесс, который имеет XML-интерфейс для внутренней коммуникации с другими модулями или с графическим интерфейсом (рис. 5), таким образом, разработанная система является гибкой и легко расширяемой.

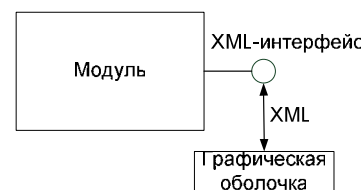


Рис. 5. Архитектура модуля

С другой стороны, каждый модуль может состоять из субмодулей, запускаемых в виде отдельных потоков. Тогда один из них является контрольным субмодулем, который организует работу других субмодулей и общается с другими модулями системы (рис. 6).

При разработке системы принимались во внимание оба основных типа архитектур: клиент-сервер (рис. 7) и мультиагентная архитектура (рис. 8).

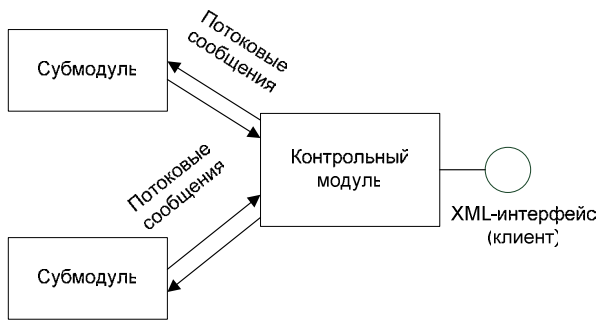


Рис. 6. Архитектура субмодулей

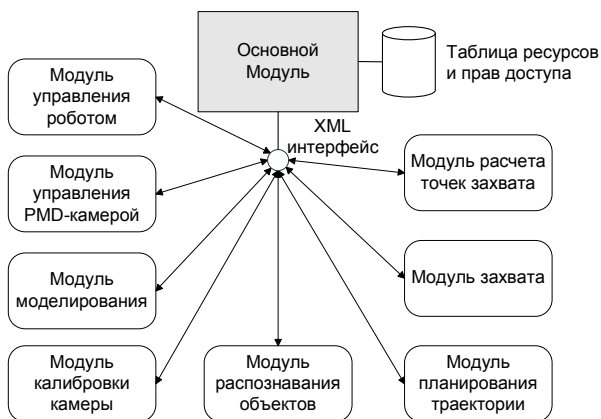


Рис. 7. Архитектура клиент-сервер

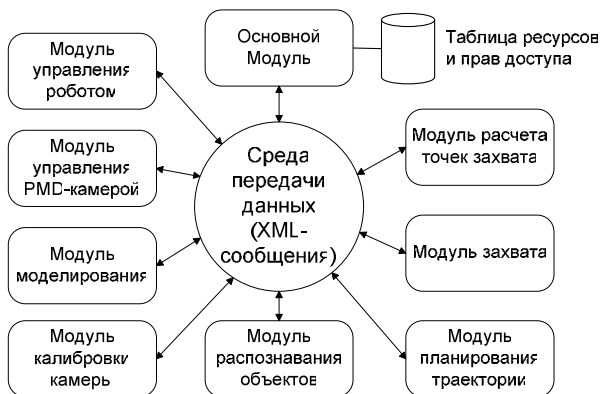


Рис. 8. Мультиагентная архитектура

Основное различие этих архитектур – это способ коммуникации модулей между собой. В случае клиент-серверной архитектуры все взаимодействие идет через контрольный модуль, который осуществляет применение прав доступа к ресурсам (модулям).

При использовании мультиагентной системы каждый модуль может общаться с другими напрямую, соответственно каждый модуль должен контролировать свои ресурсы сам.

При разработке системы с использованием роботов, надежность и безопасность использования стоят наравне с быстродействием и эффективностью. Поэтому разработанная система позволяет организовать внутреннее взаимодействие модулей, используя оба подхода, что позволяет выбрать оптимальный способ взаимодействия, принимая во внимание специфику модуля.

4. ТЕСТОВЫЙ СТЕНД

В процессе решения задачи была построена тестовая система, аппаратная часть которой состоит из: манипулятора KUKA KR-60HA, манипулятора Reis Robotics RV-6L, сенсора PMD-камеры ifm o3d100, захвата Schunk PG-70 (рис. 9), компьютера на базе AMD Athlon 64 X2 4800+. В качестве объектов были использованы полиэтиленовые трубы (рис. 9). В рабочей области находятся: стол № 1 с контейнером, стол № 2 для распознавания объектов, 2 коробки для сортировки объектов (рис. 10).



Рис. 9. Захват



Рис. 10. Тестовый стенд

Построенная система позволила на практике проверить разработанные модели и алгоритмы, провести тесты на реальных деталях, а также выявить и устранить недостатки проектирования ПО на начальных этапах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье был предложен подход к решению задачи извлечения деталей из контейнера, основанный на использовании новейшей сенсорной технологии Photo Mixer Device. Данная технология и оптимизированные алгоритмы реконструкции сцены и управления манипулятором позволяют не только ускорить процесс, но и улучшить точность и надежность работы системы в целом.

После анализа особенностей технологии PMD, представленного во втором разделе, были выделены ее достоинства и недостатки в соответствии с поставленной задачей. Предложены методы компенсации недостатков камеры, реализованные в разработанном ПО. Также предложен алгоритм реконструкции сцены по 3-мерным данным PMD-камеры, который позволяет существенно сократить время моделирования и сложность требуемых вычислений. Проанализированы особенности разработки стратегии захвата и планирования траектории движения манипулятора в задаче извлечения деталей из контейнера. В третьем разделе представлены архитектурные особенности программного обеспечения разработанной системы и описано аппаратное обеспечение. В результате исследований был создан программно-аппаратный комплекс, позволяющий эффективно решать задачу извлечения объектов из контейнера. В будущих исследованиях планируется сделать обзор известных методов планирования траекторий манипулятора, проанализировать особенности планирования в условиях задачи извлечения объектов из контейнера и разработать оптимизированный метод, который будет внедрен в комплекс с учетом особенности задачи. Также одним из интересных направлений дальнейших исследований являются исследования в области безопасного взаимодействия человека и робота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hema Ch. R.** Stereo Vision System for a Bin Picking adept robot // Malaysian Journal of Computer Science. 2007. Vol. 20(1).
2. Laser ranging and video imaging for bin picking / F. Boughorbel [et all] // Journal of Assembly Automation. 2003.

3. Robust Motion Generation for Vision-Guided Robot Bin-Picking / S. Leonard [et all] // Proc. of IMECE2007, ASME, Seattle, Washington, USA, 2007.

4. **Müller M.** Picking strategies for object singularization using industrial robots: Ph. D. thesis. Universität Karlsruhe (TH), 2001.

5. Three-dimensional intelligent sensing based on the PMD technology / R. Schwarte [et all] // Proc. of SPIE2001, Volume: 4540, pp.482-487, 2001.

6. Real-time Framework for Bin-Picking Problem using Advantages of PMD-Technology / I. R. Mamaev [et all] // Proc. of 10th Int. Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT). 2008. Vol. 2. P. 6–10.

7. MSM-PMD as correlation receiver in a new 3D-ranging system / B. Buxbaum [et all] // Proc. of SPIE – Remote Sensing, Laser Radar Techniques: «Ranging and Atmospheric Lidar», Toulouse, 2001.

8. 3d-camera of high 3d-framerate, depth-resolution and background light elimination based on improved pmd (photonic mixer device)-technologies / H. Kraft [et all] // Proc. of 6th Intern. Conf. for Optical Technologies, Optical Sensors and Measuring Techniques (OPTO, 2004).

9. **Graf J., Woern H.** Oriented Median Filtering Preserving Significant Image Structures // Proc. of 9th Int. Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT). 2007. Vol. 2. P. 4–8.

ОБ АВТОРАХ



Юсупова Нафиса Исламовна, проф., зав. каф. выч. мат. и киб., декан ФИРТ. Дипл. радиофизик (Воронежск. гос. ун-т, 1975). Д-р техн. наук по упр-ю в техн. сист. (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. критич. сит. упр-я, информатики.



Вёрн Хейнц, проф. Дипл. инж. по электротехн. (Ун-т Штутгарта, 1973). PhD по электротехн. (там же, 1978). Руководитель Института Управления Процессами и Робототехники, Университет Карлсруэ, Германия.



Мамаев Ильшат Ринатович, аспирант каф. выч. мат. и киб. Дипл. математик-программист (УГАТУ, 2007).