

О.Н. Сухоручкина, Н.В. Прогонный, М.А. Воронов

Интерпретация и использование измерений сенсора-дальномера в задачах управления автономным мобильным роботом

Рассмотрено практическое использование измерений дальномеров *Sharp GP2Y0A02YK* для анализа формы и положения объектов, находящихся в зоне функционирования мобильного робота при автономном выполнении им заданий. Предложен контекстно зависимый подход к сбору, интерпретации и использованию системой управления робота дальнометрических данных.

Ключевые слова: мобильный робот, автономное управление, пространственное восприятие, дальномер.

Розглянуто практичне використання вимірів далекоміра *Sharp GP2Y0A02YK* для аналізу форми і положення об'єктів, розташованих у зоні функціонування мобільного робота під час автономного виконання ним завдань. Запропоновано контекстно залежний підхід до збору, інтерпретації і використання системою управління робота далекометричних даних.

Ключові слова: мобільний робот, автономне управління, просторове сприйняття, далекомір.

Введение. Стремление разработчиков мобильных роботов (МР) к созданию устройств, способных автономно выполнять различные задания в недетерминированной среде, часто приводит к оснащению таких роботов дорогостоящими специализированными системами пространственного восприятия. Использование на борту робота современных специализированных устройств локации и автоматического построения трехмерных моделей внешнего мира, таких как лазерные сканеры, система *MS Kinect* и другие комплексные аппаратно-программные *ToF*-системы (*Time of Flight Systems*), существенно повышает его стоимость и оправдано при разработке роботов, предназначенных выполнять задания особой сложности и ответственности. Для интенсивно развивающегося рынка бытовых сервисных роботов, ориентированных на непрофессионального пользователя, предпочтительны более простые и дешевые источники локационных данных, такие как сенсоры-дальномеры с инфракрасным или ультразвуковым излучением. Каждый из подобных типов сенсоров имеет специфику поведения выходных сигналов, интерпретация которых проходит, как правило, несколько этапов, а ее конечный результат непосредственно сказывается на уровне адекватности восприятия роботом окружающего пространства и, соответственно, на результатах автоматического управления им. Этим объясняется актуальность разработки методики интерпретации данных дальномеров конкретных типов, ори-

ентированной на их использование в задачах управления МР, чему и посвящена данная статья.

Постановка задачи

МР, используемый в данных исследованиях, оснащен аналоговыми инфракрасными сенсорами-дальномерами модели *Sharp GP2Y0A02YK*. На рис. 1 схематически показаны диаграмма направленности данного дальномера и его общий вид. Как и прочие измерительные устройства, данный дальномер имеет свои особенности формирования сигналов, характерные проблемы погрешности измерений и т.д. Этапу интерпретации измерений дальномера предшествовали анализ особенностей формирования сигналов данным типом датчика, выбор практического подхода к реализации системы сбора, первичной обработки и интерпретации этих сигналов на борту робота, описанные в [1].

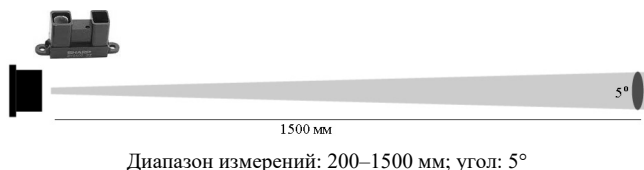


Рис. 1. Дальномер *Sharp GP2Y0A02YK*

На практике пространственное восприятие внешнего мира роботом с помощью дальномеров требует определенной организации информационного процесса, отвечающего за получение текущих измерений дальномеров, их анализ, интерпретацию, представление в определенных структурах памяти и методы исполь-

зования, что во многом зависит от избранного принципа реализации системы управления (СУ) автономного робота и возложенных на нее задач. Структурные решения интеллектуального управления экспериментального образца МР *ERIC*, положенные в основу в данном случае, описаны в [2].

Как правило, измерения сенсоров-дальномеров используются для реализации следующих возможностей СУ МР:

- построение и текущая коррекция модели (карты) окружающего робот пространства;
- коррекция параметров движения робота среди препятствий;
- реактивное управление движением МР для избежания столкновений с препятствиями;
- определение положения целевого объекта для его успешного захвата исполнительным органом робота и т.д.

В рамках рассматриваемой задачи в математических моделях разработанной управляющей системы автономного МР заложены некоторые ограничения на условия его функционирования. МР *ERIC* относится к типу комнатных (*indoor robots*). Поверхность его движения – горизонтальная плоскость. Окружающие объекты, воспринимаемые бортовыми дальномерами, – твердые непрозрачные тела, поверхность которых не имеет зеркальных свойств. Понятно, что в модели мира, автоматически формируемой СУ робота, могут появиться модели только тех фрагментов поверхностей объектов, которые способна воспринять техническая система. Поскольку дальномеры жестко закреплены на корпусе МР так, что продольные оси их диаграмм направленности параллельны плоскости движения робота, то при движении робота в зону чувствительности дальномеров попадают лишь фрагменты поверхностей объектов, расположенные на высоте установки дальномера на корпусе робота. Соответственно, модели сенсорного восприятия таких объектов имеют вид их сечений, параллельных плоскости движения МР. На рис. 2 представлена 3D модель робота *ERIC* с необходимыми для постановки задачи систе-

мами координат (СК). Здесь *OXYZ* – неподвижная декартова СК, связанная с внешним миром робота (далее МСК – мировая СК); $X_{Rob}, Y_{Rob}, Z_{Rob}$ – СК, связанная с корпусом МР; $X_{Rf_L}, Y_{Rf_L}, Z_{Rf_L}, X_{Rf_R}, Y_{Rf_R}, Z_{Rf_R}, X_{Rf_F}, Y_{Rf_F}, Z_{Rf_F}$ – СК, связанные соответственно с левым, правым и передним дальномерами.

В текущей версии реализации СУ МР *ERIC* от каждого его сенсора-дальномера в оперативную память постоянно поступает упорядоченная по времени последовательность измерений с частотой около 30 мс. При этом моментам времени, когда отсутствуют измерения в рабочем диапазоне зоны чувствительности дальномера, соответствуют специальные записи данной последовательности, далее называемые *n/a (not available)*.

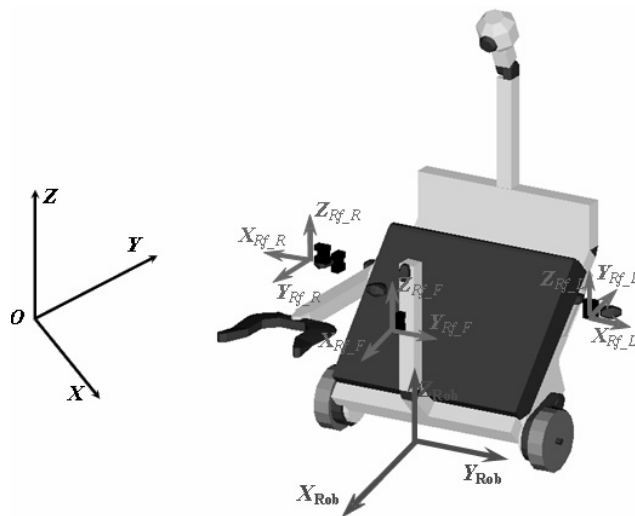


Рис. 2. 3D-модель мобильного робота *ERIC*

Зная положение и ориентацию регистрирующего элемента сенсора-дальномера относительно СК робота $X_{Rob}, Y_{Rob}, Z_{Rob}$ и координаты положения СК робота относительно МСК *OXYZ* в момент, соответствующий времени получения сенсорного измерения, каждому измерению дальномера можно поставить в соответствие координаты определенной точки пространства *OXYZ*. В лучшем случае эта точка порождена сигналом дальномера, отраженным от поверхности попавшего в зону чув-

ствительности объекта, в худшем – это шум измерительного процесса.

Пример данных, получаемых СУ от переднего дальномера при вращении МР на месте со скоростью 5 град/с, показан в таблице. Здесь *Time* – время получения измерения дальномера; $(X_{Rob}, Y_{Rob}, Ang_{Rob})$ – соответствующее этому измерению положение робота в МСК, (X_{Obj}, Y_{Obj}) – положение в МСК точки поверхности объекта, ассоциируемой с измерением дальномера; *Dist* – расстояние в СК дальномера до точки (X_{Obj}, Y_{Obj}) .

Таблица

<i>Time</i> , ч:м:с	X_{Rob} , мм	Y_{Rob} , мм	Ang_{Rob} , град	X_{Obj} , мм	Y_{Obj} , мм	<i>Dist</i> , мм
11:37:27,718	1308,2	510,8	90,0	-0,5	924,0	784,0
11:37:27,750	1308,2	510,8	89,8	3,4	924,0	784,0
11:37:27,781	1308,2	510,8	89,6	7,1	915,0	775,0
11:37:27,812	1308,2	510,8	89,6	7,1	913,0	773,0
11:37:27,843	1308,2	510,8	89,3	n/a	n/a	n/a
11:37:27,875	1308,2	510,8	89,1	n/a	n/a	n/a
11:37:27,906	1308,2	510,8	89,1	n/a	n/a	n/a
11:37:27,937	1308,2	510,8	88,9	18,2	912,8	773,0
11:37:27,968	1308,2	510,8	88,6	22,0	912,7	773,0
11:37:28,000	1308,2	510,8	88,6	21,9	910,7	771,0
11:37:28,031	1308,2	510,8	88,4	25,7	912,6	773,0

Отметим, что соседние значения элементов последовательности измерений, формируемой по мере поступления данных, могут быть порождены вовсе не соседними точками в пространстве *OXYZ*. Геометрическое соседство точек зависит от взаимной конфигурации, которую в момент считывания данных дальномера составляют зона чувствительности дальномера, поверхность объекта и траектория движения МР. Таким образом, упорядоченная по времени последовательность измерений на некоторых участках может не соответствовать геометрической последовательности точек, составляющих контур сечения объекта.

В данной статье используется упрощенная модель дальномера, когда его измерения ассоциируются с точками в пространстве, лежащими на продольных осях диаграмм направленности (оси $O_{Rf_R} X_{Rf_R}$ и $O_{Rf_L} X_{Rf_L}$) рис. 3. В

[1] показана оценка максимальной погрешности, привносимой такой моделью сенсорного восприятия. Приводя к существенному сокращению необходимых вычислительных ресурсов, указанное упрощение геометрической модели сенсорного восприятия внешнего мира не столь важно на фоне иных неустранимых неопределенностей, сопровождающих процесс автономного управления роботом.

Пример 3D моделей фрагментов объектов, полученных по исходным данным дальномеров МР, показан на рис. 4. Зоны чувствительности сенсоров-дальномеров изображены лучами, условно аппроксимирующими их диаграммы направленности.

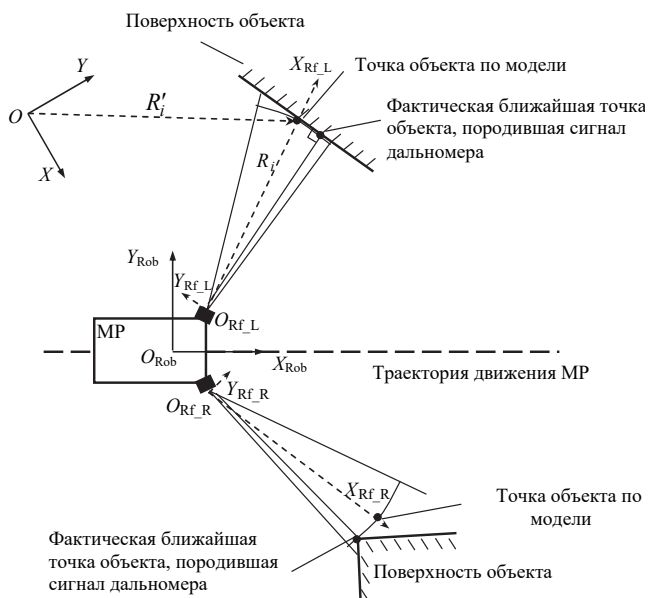


Рис. 3. Модель восприятия сенсора-дальномера

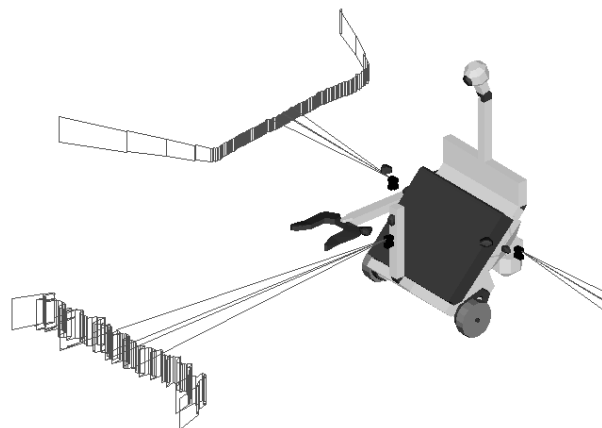


Рис. 4. Модели первичного восприятия объектов дальномерами МР

Задача интерпретации дальнометрических данных далее рассматривается как задача определения плоских контуров сечений объектов, воспринимаемых сенсором-дальномером, и состоит из следующих этапов:

- устранение во входном множестве данных системных и случайных погрешностей (этап фильтрации);
- выделение из множества данных связанных подмножеств, относящихся либо к непрерывным фрагментам контура одного объекта, либо к контурам различных объектов, и интерпретация этих подмножеств в виде последовательных точек контуров объектов (этап сегментации);
- представление контура объекта в МСК в виде последовательности отрезков (этап аппроксимации).

Следует учитывать, что форма, размеры и число объектов, породивших множество дальнометрических данных, заранее неизвестны. Также в общем случае неизвестны цветовые характеристики поверхностей сканируемых объектов, что сказывается на неопределенности оценки погрешности измерений дальномера с инфракрасным излучателем [1].

Основная цель рассматриваемой задачи – получение в режиме реального времени компактного представления формы и положения объектов в рабочей зоне МР.

Контекстная зависимость интерпретации множества измерений дальномера

При выполнении роботом конкретных действий получаемые множества измерений дальномеров имеют характерные особенности. Такими действиями МР могут быть, например:

- сбор данных дальномеров при движении МР вокруг объекта для исследования его формы и положения и построения модели (поведение МР при выполнении задания *Исследуй объект*);
- сканирование дальномером некоторого сектора пространства для уточнения модели мира вокруг текущего положения МР (задание *Уточни обстановку*);
- уточнение положения и ориентации объекта по данным дальномера перед захватом его исполнительным органом робота (задание *Возьми объект*) и т.д.

Также в некоторых ситуациях для определенного сектора пространственной зоны управляющая система робота может диагностировать, что полученные сенсорные данные недостаточны для их однозначной интерпретации. В таких случаях СУ активизирует действия МР, направленные на повторный сбор данных, изменив положение робота и скорость сканирования данной зоны (задание *Исследуй сектор*).

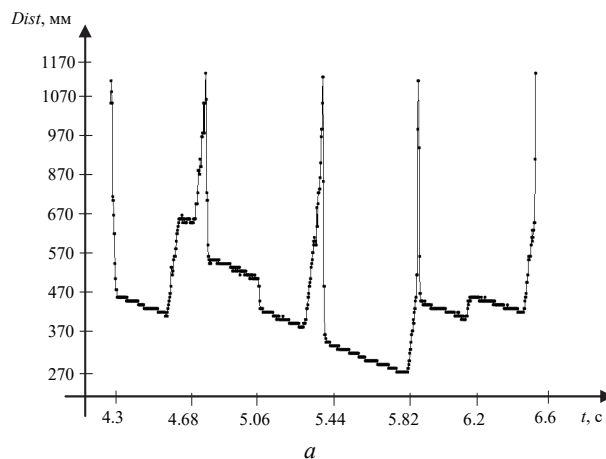
Каждое из указанных действий МР порождает свой контекст как совокупность информации, известной и учитываемой при анализе сенсорных данных.

На рис. 5 и 6 показаны примеры множеств исходных данных дальномера при выполнении роботом двух различных заданий (рис. 5, а, рис. 6, а) и соответствующих точек в МСК (рис. 5, б, рис. 6, б).

Модуль СУ для интерпретации измерений дальномеров реализован так, что этапы анализа данных и параметры используемых алгоритмов выбираются системой в зависимости от контекста событий, происходящих и регистрируемых управляющей системой МР.

Информацией, составляющей в данном случае контекст, является:

- тип активного задания и поведения [2], во время которых происходит сбор сенсорных данных;
- скорость движения МР;
- текущая геометрическая модель внешнего мира робота;
- оценка достоверности модели объекта внешнего мира робота, формируемая СУ.



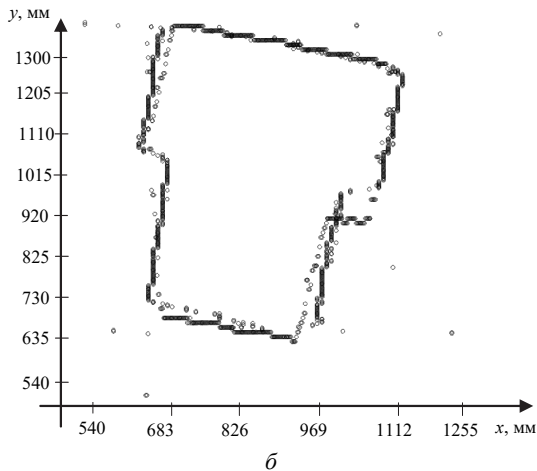


Рис. 5. Множество измерений дальномера. Задание *Исследуй объект*: *a* – дальности до объекта; *b* – координаты точек контура объекта

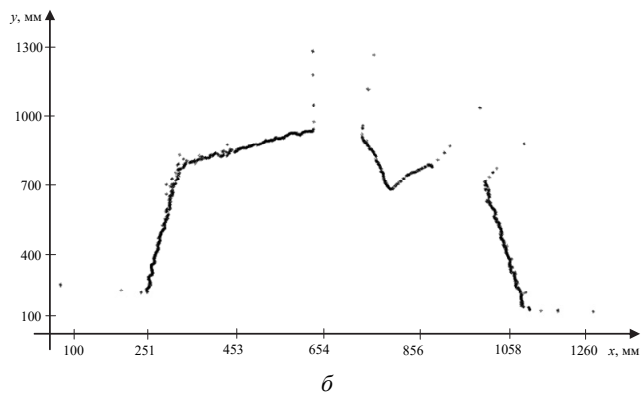
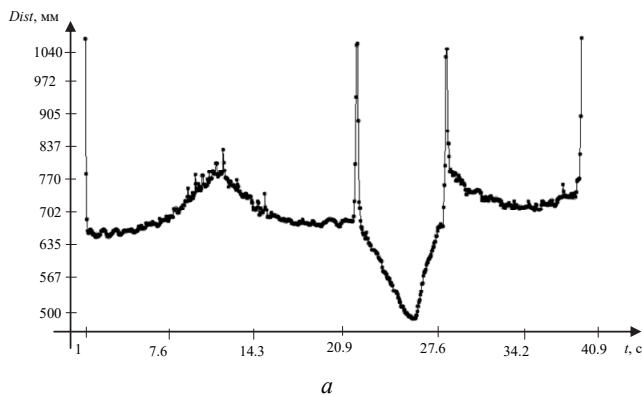


Рис. 6. Множество измерений дальномера. Задание *Уточни обстановку*: *a* – дальности до объекта; *b* – координаты точек контура объекта

Получаемые от рассматриваемого типа дальномера данные об объектах характеризуются наличием погрешностей системного и случайного характера. Системные погрешности на уровне исходных измерений дальномера зависят от [1]:

- собственных погрешностей дальномера, связанных с физическим принципом организации измерений и качеством изготовления датчика;
- погрешностей математической модели интерпретации аналогового сигнала дальномера и аппаратно-программной реализации его квантования.

Системные погрешности, наблюдаемые на данных, получаемых в результате пересчета измерений дальномера в точки МСК, помимо указанных выше базовых причин, вызваны рядом неустраняемых неопределенностей СУ робота, таких как:

- вероятностный характер оценки текущего положения МР относительно МСК;
- ошибки синхронизации параллельных асинхронных информационных процессов, связанных с управлением движением МР и сбором сенсорных данных.

Также на точность исходно получаемых точек контура объекта влияет указанное выше упрощение геометрической модели восприятия сенсора-дальномера.

К погрешностям случайного характера можно отнести ошибочные измерения дальномера, вызванные неблагоприятным взаимным положением зоны чувствительности дальномера и поверхности объекта. Как правило, такие погрешности наблюдаются в начале и в конце сканируемого непрерывного фрагмента поверхности объекта и автоматически обнаруживаются с учетом контекста выполняемого роботом задания.

Вне зависимости от выполняемого МР задания, главное – получение адекватных моделей объектов с минимальными затратами времени и памяти, для чего необходимы:

- выделение наиболее информативных данных (удаление шума), и представление их в некоторой структуре памяти СУ;
- минимизация данных, описывающих форму исследуемого объекта с достаточной точностью.

На конкретных данных покажем этапы и результаты анализа и интерпретации дальнометрических данных.

Результаты интерпретации измерений сенсора-дальномера системой управления МР

Как уже показано, в последовательности исходных данных дальномера могут содержаться значения, нарушающие относительную монотонность измерений (рис. 5, *a* и 6, *a*), что связано с краевым эффектом при сканировании объектов. Также исходное множество измерений дальномера в используемой структуре данных может содержать строки, не содержащие конкретных величин измерений (запись n/a), что свидетельствует о потере непрерывности контакта зоны чувствительности дальномера с поверхностью какого-либо объекта и свойственно окончаниям монотонных фрагментов измерений. Эта особенность дает возможность разделить исходную последовательность дальностей на подмножества, содержащие не более некоторого числа подряд поступающих показаний n/a . Назовем эти подмножества первым уровнем разбиения множества исходных данных. С большой долей вероятности такие подмножества измерений порождены связанными участками поверхностей сканируемых объектов.

По каждому выделенному подмножеству первого уровня для устранения шума, вызванного краевым эффектом, выполняем фильтрацию дальнометрических данных на основе статистического фильтра [3].

Оставшиеся после первого этапа фильтрации данные требуют устранения собственного шума измерений дальномера. Для этого проводится еще одно разбиение множества данных на подмножества точек, последовательная оценка расстояний между которыми не имеет скачков. Поиск такого типа разрывов в последовательностях точек опирается на идею *наивного детектора разрывов*, описанную в [4]. Результаты сегментации второго уровня для исходных данных, полученных во время выполнения МР различных заданий, показаны на рис. 7, где цифрами 1–4 обозначены соответствующие подмножества точек.

Далее на каждом подмножестве точек, вошедших в разбиение второго уровня, выполняется фильтрация собственного шума измере-

ний дальномера на основе медианного фильтра [5]. Данный фильтр эффективно сглаживает *выбросы* на множестве измерений, не изменяя размер входного множества. Поскольку в нашем случае для конечной модели объекта первоначально имеем избыточное число данных сенсора-дальномера, идея медианного фильтра используется лишь для обнаружения выбросов. На каждой итерации алгоритма значение центрального элемента окна фильтра сравнивается со значением медианы всего окна и, если они совпадают, данный элемент остается в выходном множестве, в противном случае – удаляется. Окончательные результаты фильтрации исходных данных, полученных во время выполнения МР различных заданий, показаны на рис. 8.

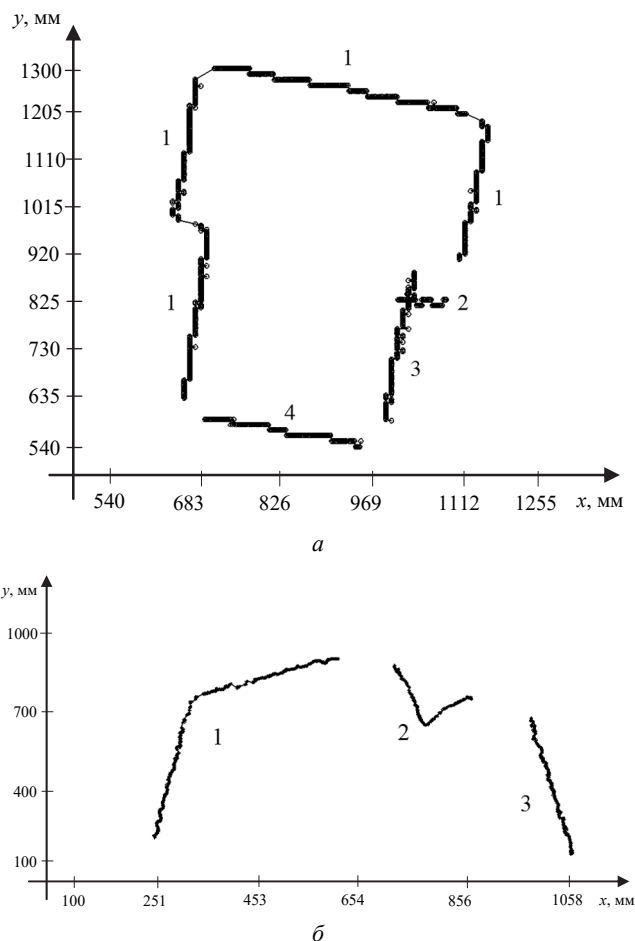
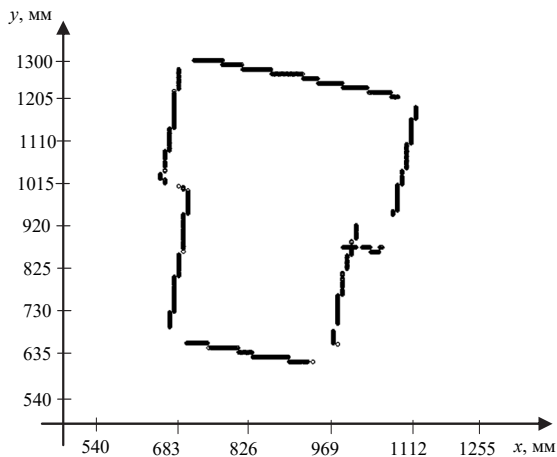
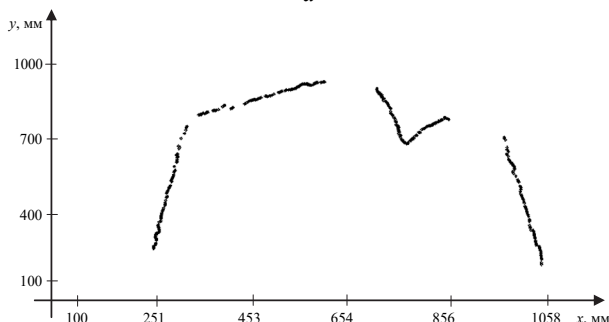


Рис. 7. Результат разбиения исходных измерений дальномера: *a* – задание *Исследуй объект*; *б* – задание *Уточни обстановку*

Для выделения последовательностей точек, которые с заданной точностью можно аппроксимировать отрезками прямых, использован алгоритм, описанный в [6]. Сегментация исходных данных, полученных во время выполнения МР различных заданий, на линейно аппроксимируемые подмножества точек контура объекта показана на рис. 9.

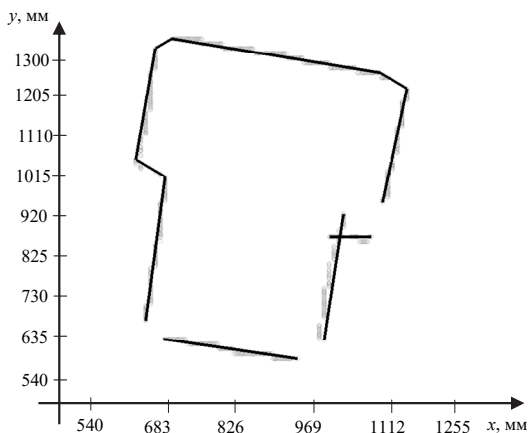


а

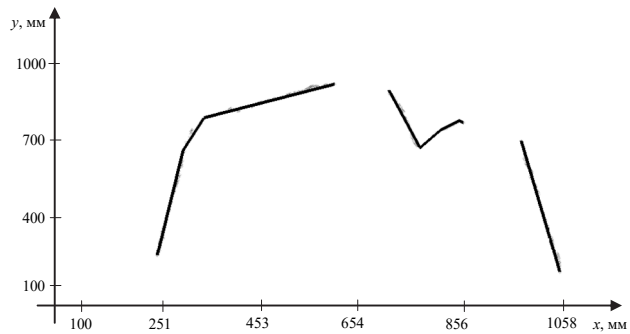


б

Рис. 8. Результат полной фильтрации исходных измерений дальномера: а – задание *Исследуй объект*; б – задание *Уточни обстановку*



а



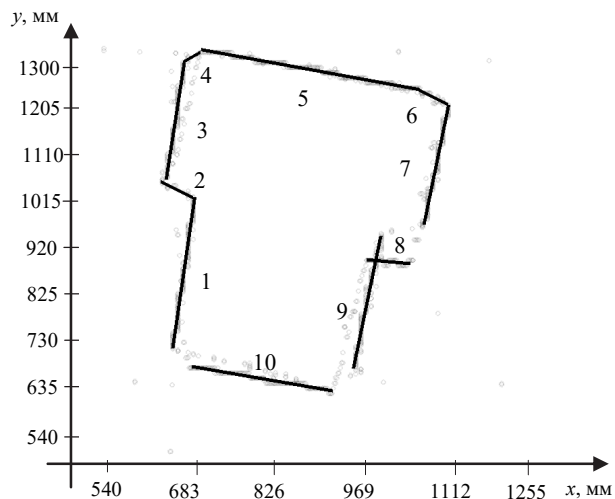
б

Рис. 9. Сегментация измерений дальномера: а – задание *Исследуй объект*; б – задание *Уточни обстановку*

Финальный этап интерпретации измерений дальномера – линейная аппроксимация каждого выделенного ранее сегмента. Благодаря нескольким шагам предварительной подготовки данных, метод МНК дает хороший результат. Компактно представленные контуры объектов, полученные на финальном этапе, показаны на рис. 10 в виде последовательностей отрезков.

Например, при выполнении роботом задания *Исследуй объект* в итоге анализа и интерпретации измерений дальномера имеем:

- размер входного множества измерений дальномера – 1134 точек;
- после статистического фильтра – 898 точек;
- после медианного фильтра – 828 точек;
- после аппроксимации контура объекта – 20 точек (10 отрезков);
- время обработки – 0,126 с.



а

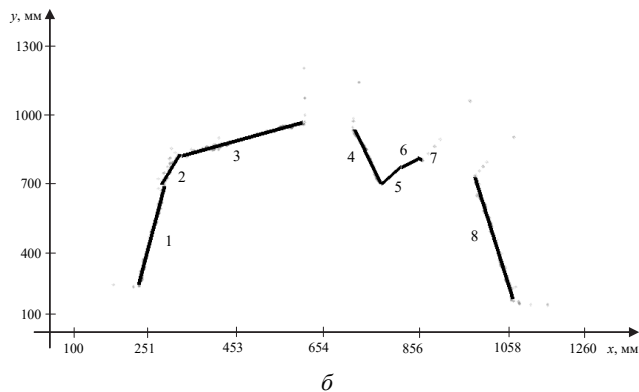


Рис. 10. Линейная аппроксимация измерений дальномера: а – задание *Исследуй объект*; б – задание *Уточни обстановку*

Вычислительные процессы описанных исследований обеспечивает бортовой компьютер робота с конфигурацией *Intel(R) Core(TM) i3-2310M CPU 2.10GHz*.

Отметим, что в связи с непредсказуемым характером исходного множества анализируемых измерений дальномера выполнение фильтрации сразу на всем множестве может приводить либо к потере краевых фрагментов моделей объектов, либо к ложному сглаживанию контуров моделей объектов в местах излома. Эти условия объясняют необходимость предварительной двухэтапной сегментации входного множества измерений на подмножества непрерывных и монотонных данных.

Заключение. Все возрастающее число публикаций о разных аспектах робототехники свидетельствует о широком интересе общества к применению МР в самых различных сферах. Наибольший интерес представляют роботы, способные без вмешательства человека выполнять различные задания в условиях неполностью детерминированной среды. При этом важное место занимает способность управляющей системы МР интерпретировать измерения бортовых сенсоров-дальномеров для формирования адекватной модели мира робота и принятия решений о целесообразных действиях, ведущих к успешному выполнению задания пользователя.

Наличие в СУ МР программного модуля интерпретации сенсорных данных обеспечива-

ет возможность своевременной коррекции модели окружающего робот мира. При этом, помимо вычислительной эффективности, необходимой для систем реального времени, используемые алгоритмы должны быть также применимы при неопределенном характере входных данных, поскольку измерения сенсоров-дальномеров происходят при движении МР в среде с различными по форме и расположению окружающими объектами.

Функциональные возможности нашего МР предполагают выполнение им ряда заданий с использованием интерпретации текущей информации сенсоров-дальномеров. Успешное автономное выполнение роботом заданий *Исследуй объект*, *Уточни обстановку*, *Возьми объект* и *Подойди к объекту* в различных внешних условиях, в том числе среди движущихся случайным образом объектов-препятствий и целевых объектов, свидетельствует об удачной практической реализации всех составляющих информационного процесса, связанного с дальнометрическими измерениями.

1. *Об обработке дальнометрической сенсорной информации* / О.Н. Сухоручкина, Н.В. Прогонный, В.С. Ланбин и др. / УСиМ. – 2006. – № 5. – С. 77–84.
2. *Сухоручкина О.Н.* Структуры и информационные процессы интеллектуального управления мобильным роботом // Зб. наук. праць Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. – Київ, 2012. – 62. – С. 93–101.
3. *Removing outliers using a Statistical Outlier Removal filter.* – http://pointclouds.org/documentation/tutorials/statistical_outlier.php
4. *Borges G.A., Aldon M.-J.* Line Extraction in 2D Range Images for Mobile Robotics // J. of Intelligent and Robotic Systems. – 2004. – 40. – P. 267–297.
5. *Stone D.C.* Application of median filtering to noisy data // Canadian J. of Chemistry, 1995. – 73(10). – P. 1573–1581.
6. *Lowe D.G.* Perceptual Organization and Visual Recognition. – Springer, 1985. – 162 p.

Поступила 31.01.2017

E-mail: sukhoru@gmail.com, progonny@gmail.com,
corvus5e@gmail.com

© О.Н. Сухоручкина, Н.В. Прогонный, М.А. Воронов, 2017

Interpretation and Use of the Rangefinder Measurements in the Autonomous Mobile Robot Control Problems

Key words: mobile robot, autonomous control, spatial perception, rangefinder.

The problems of the practical use of measurements received from Sharp GP2Y0A02YK rangefinders for the analysis of the shape and position of the objects in the operation zone of the mobile robot while carrying out the autonomous tasks are considered. A context-dependent approach to the collection, interpretation and use of rangefinder data by robot control system is presented.

The simple and inexpensive sources of data about the mobile robot (MR) environment, such as infrared or ultrasonic rangefinders are preferred for equipping domestic MR or other MR for nonprofessional users. The autonomous MR used in present research is equipped with Sharp GP2Y0A02YK analog infrared rangefinder.

The statement of the problem for data collection and interpretation proposed in this article is related to the conditions of the autonomous indoor MR operation where the task of forming the models of surrounding objects can be replaced by the task of finding a plane contour of these objects. The specificity of the rangefinder data collection while carrying out such MR missions as: studying of the objects form and position, the adjustment of the environment model, the causes and types of the rangefinder data errors is indicated.

The special features of the primary sets of rangefinder measurements and the corresponding points in the fixed coordinate system of the robot operation environment are considered. A preliminary segmentation of the original data for more effective filtering at continuous and monotonic subsets of points is proposed.

Construction of the compact representation of objects contours is performed as a sequential linear approximation of the separate segments of the filtered rangefinder data.

The illustrations of the sequential analysis results and interpretation of the original rangefinder data sets depending on the robot missions context are given.

1. Suhoruchkina O.N., Progonnyiy N.V., Lanbin V.S., Lyudovik T.V. Ob obrabotke dalnometricheskoy sensornoy informatsii. Upr. sist. mas., 2006, N 5, P. 77–84 (In Russian).

2. Suhoruchkina O.N. Struktury i informatsionnye protsessyi intellektualnogo upravleniya mobilnyim robotom. Zbirnyk nauk. prats Institutu problem modelyuvannya v energetitsi im. G.E. Puhova NAN Ukrainy. Kiev, 2012, Vyp. 62, P. 93–101 (In Russian).

3. Removing outliers using a Statistical Outlier Removal filter. <http://pointclouds.org/> URL: http://pointclouds.org/documentation/tutorials/statistical_outlier.php.

4. Borges G.A., Aldon M.-J. Line Extraction in 2D Range Images for Mobile Robotics. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2004. N 40, P. 267–297.

5. Stone D.C. Application of median filtering to noisy data. Canadian Journal of Chemistry, 1995, Vol. 73(10), P.1573–1581.

6. Lowe D.G. Perceptual Organization and Visual Recognition. Hingham, USA: Kluwer Academic Publishers Norwell, 1985.



Для соответствия научно-метрическим базам при подаче статей к рассмотрению, авторы должны подать метаданные на английском языке:

- ФИО
- место и адрес работы каждого автора
- расширенную аннотацию (до 2000 знаков с пробелами и рубриками:
Introduction, Purpose, Methods, Results, Conclusion)
- список пристатейной литературы в переводе или транслитерации.

При оформлении списков литературы к расширенной аннотации на английском языке, можно пользоваться сайтом

<http://translit.net> для русских ссылок

<http://ukrlit.org/transliteratsiia> для украинских.