

УДК 629.78

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

© 2013 Е. Ю. Барышев, Н. Д. Сёмкин, К. Е. Воронов

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье приведена конструкция макета бортовой системы для регистрации объектов космического пространства. Представлены результаты измерения положения и вектора скорости объектов, полученные с помощью описанной установки.

Пылевая частица, космический мусор, система регистрации, видеокамера, обработка изображения, вектор скорости объекта.

Статья посвящена отработке лабораторного макета бортовой системы регистрации пылевых частиц космического пространства, объектов космического мусора, метеоритов и параметров их движения [1]. Система состоит из трёх видеокамер, установленных на базовом расстоянии друг от друга таким образом, что одноимённые строки видеокамер расположены вдоль одной линии [2]. Принцип работы системы основан на стереоскопическом эффекте. Для снижения количества ошибок совмещения при большом количестве объектов применяется третья камера для лучшей идентификации объектов в видеоряде.

Экспериментальный стенд состоит из трёх камер и обеспечивает следующие регулировки камер:

- 1) поворот каждой камеры вокруг своей оптической оси;
- 2) поворот каждой камеры вокруг центра матрицы данной камеры в плоскости «база – оптическая ось»;
- 3) поворот каждой камеры вокруг центра матрицы данной камеры в плоскости «оптическая ось – перпендикуляр к базе».

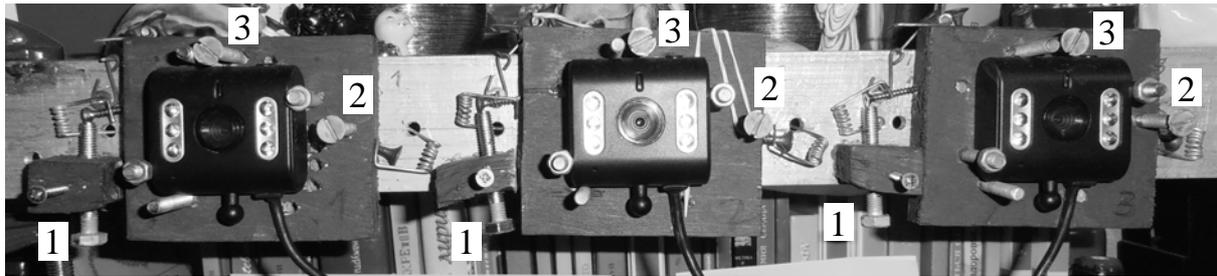
Изготовленный стенд (рис. 1) в качестве базовой поверхности использует

алюминиевый уголок, на котором на стальных опорных шариках диаметром 5 мм установлены платформы камер.

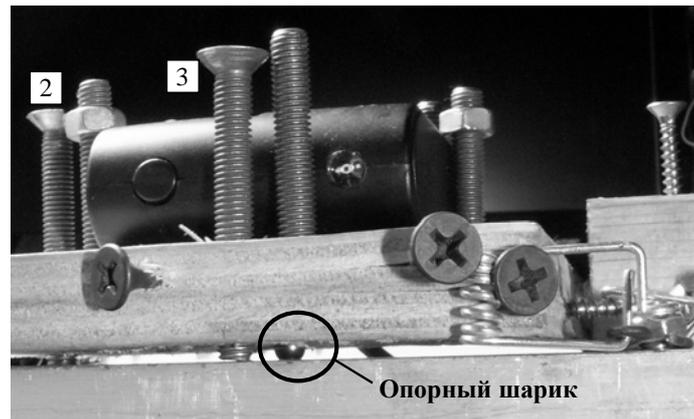
Отверстия для шариков в уголке выполнены на станке с ЧПУ, в платформах для шарика, регулировочных и крепёжных винтах – на сверлильном станке одновременно во всех платформах, сложенных в пакет. Камеры А4Tech РК-333Е устанавливаются на платформы враспор между крепёжными винтами (на фотографии без головок) и фиксируются гайками. Таким образом, базовое расстояние камер определяется точностью станка с ЧПУ, люфтами крепёжных винтов камер в платформах и точностью установки ПЗС-матрицы в корпусе камеры.

Для проведения настройки камер применяется мира, установленная на определённом расстоянии от камер параллельно базе системы, причём напротив каждой матрицы расположены метки.

Настройка камер производится с помощью регулировочных винтов, чем достигается параллельность плоскости изображения камер со строками и столбцами миры (винт 1), а винтами 2 и 3 центр изображения совмещается с соответствующей меткой миры.



а



б

Рис. 1. Фотография станда (цифрами отмечены регулировочные винты):
а – вид платформы спереди, б – вид платформы сбоку

Необходимо отметить, что настройка системы предполагает точную установку миры относительно базовых поверхностей системы:

- параллельность базы системы с плоскостью миры, а также с её горизонтальными элементами;
- перпендикулярность горизонтальных и вертикальных элементов миры.

Параллельность миры с плоскостью изображений достигается регулировкой камер, что приводит к параллельности плоскостей матриц базе и друг другу.

Допуска на установку элементов следуют из расчёта разрешения по соот-

ветствующим координатам. Так, при дальности до миры 2 м допуск на параллельность базы и миры – 8 мм (половина от разрешения по оси OZ на расстоянии 2 м), перпендикулярности элементов миры – 0,86 мм (половина от разрешения в плоскости XOY), при дальности до миры 5 м – 52,4 мм и 2,14 мм соответственно. При увеличении расстояния увеличиваются и размеры миры в связи с необходимостью покрытия всего поля зрения камер. Эскизы миры и системы с мирой показаны на рис. 2 и рис. 3 соответственно. Различными линиями обозначены поля зрения камер, цифрами – номера камер.

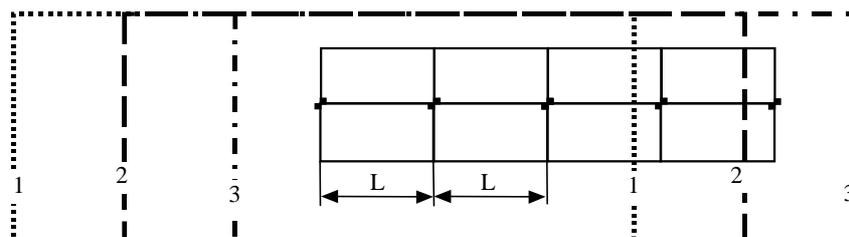


Рис. 2. Эскиз миры

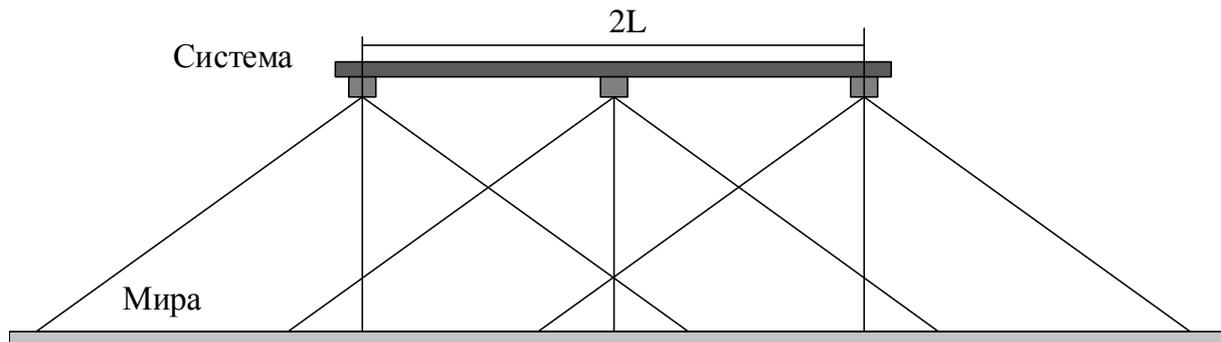


Рис. 3. Эскиз системы с мирой

При размере элемента ПЗС 6 мкм получаем размер элемента (наименьшего квадрата) миры исходя из проекции пикселя 2,33 мм и 5,83 мм. Для удобства использования размер квадрата можно увеличить до 5 раз (11,67 и 29,2 мм) и с учётом этого контролировать изображение квадрата в пяти пикселях.

Структурная схема стенда показана на рис. 4. Необходимо учитывать, что видеокамеры должны быть подключены к разным корневым концентраторам (то есть на персональном компьютере (ПК) должны быть доступны три корневых USB концентратора).

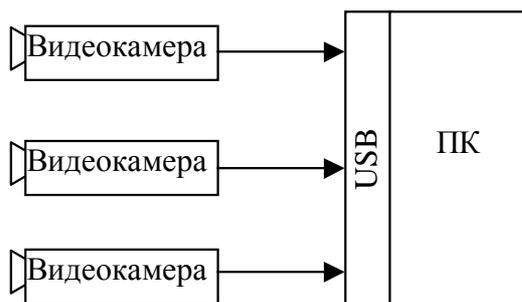


Рис. 4. Структурная схема стенда

Обработка данных, поступающих с камер, проводилась с помощью специально разработанного программного обеспечения (ПО) на языке С в среде Microsoft Visual C++ 2010 с применением библиотек OpenCV и VideoInput [3, 4].

Для проведения настройки стенда необходим попиксельный контроль изображения с целью установки камер точно в соответствии с изображением миры. Настройка положения камер производится в интерактивном режиме по увеличенному изображению центральных частей поля зрения (на рис. 5 показано слева в трёх окнах). На изображение наносятся технологические линии, позволяющие проводить настройку. Пересечением линий по центру обозначен физический центр изображения (точка с координатами 320, 240 пикселей), который выставляется по соответствующей фигуре миры, линии изображения – по линиям миры. На рис. 5 справа показан общий вид миры с камеры 2, а также настроечное окно, позволяющее просматривать всё изображение камер в увеличенном масштабе с помощью перемещения ползунков.

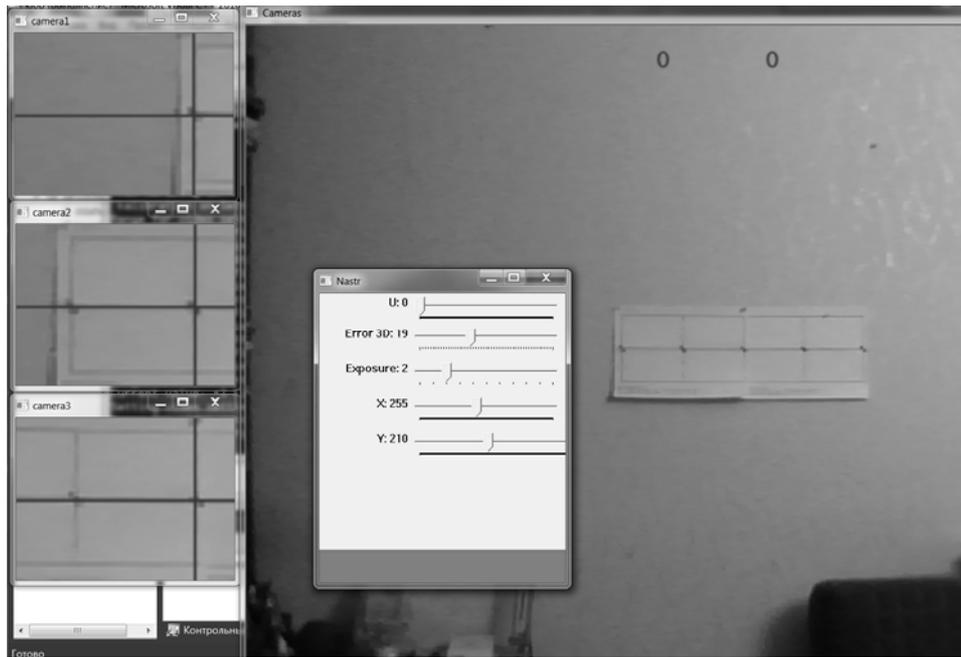


Рис. 5. Процесс настройки видеокамер

На изображениях видно, что качество картинки понижено сжатием. В связи с этим точная настройка довольно затруднительна, что необходимо учитывать в алгоритмах обработки.

Для проведения проверки работы системы в качестве объектов исследования использовалась светодиодная гирлянда. Гирлянда устанавливалась в поле зре-

ния камер на определённом расстоянии. Координаты лампочек замерялись относительно специально установленного устройства (рис. 6), ориентированного по изображению центральной камеры – правая грань вертикального элемента отображается в столбце 320, верхняя грань горизонтального элемента – в строке 240.



Рис. 6. Установка устройства для замера координат объектов

Изображения с камер представляют собой двумерные массивы данных, с которыми можно проводить операции. При этом данные изображения содержат много лишней информации (фон). Для исключения неинформативного фона необходимо провести вычитание последующего кадра изображения, полученного после включения гирлянды, из предыдущего. В резуль-

тате получаем разностное изображение (рис. 7).

На изображении, кроме следа от ламп, видно ещё и изображение провода и окружающих предметов, которые также изменили свою светимость при включении ламп. Эти изображения в данном случае являются помехой и могут быть отсеяны по уровню (рис. 8).

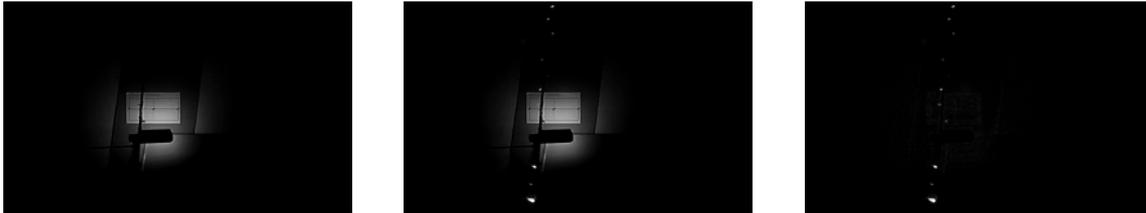


Рис. 7. Исходные изображения и их разность

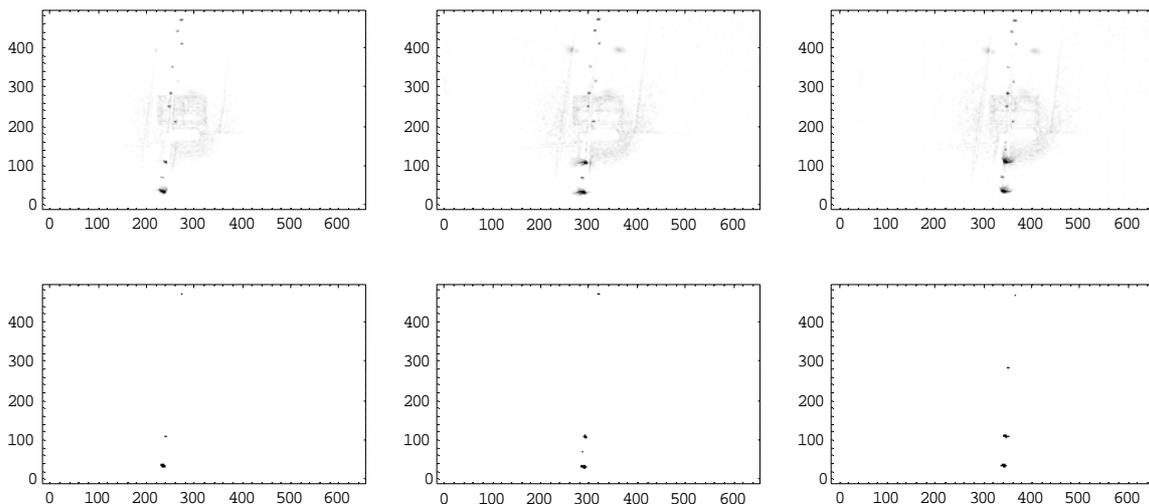


Рис. 8. Отсеивание шумовых элементов (показано в инверсном изображении)

Проведённые простые операции резко сократили объём информации для последующей обработки. В то же время изображения объектов всё ещё занимают несколько десятков пикселей и их совмещение в изображениях трёх камер представляет определённые трудности. Для выхода из данного положения применена процедура библиотеки OpenCV – cvFindContours. С помощью данной библиотеки были определены границы контуров объ-

ектов, центры данных контуров и радиусы описанных окружностей. Данная обработка дала возможность привязать объекты к определённому пикселю изображения и проводить совмещение изображений с камер на основе предлагаемой в [1] эпиполярной геометрии.

Были использованы видеокamеры и неподвижно висящая гирлянда с лампами на различном расстоянии от камер. Координаты лампочек приведены в табл. 1.

Таблица 1. Измеренные расчётные координаты объектов и ошибки измерения

№	X _{изм} , см	X _{расч} , см	ΔX, см	ΔX, %	Y _{изм} , см	Y _{расч} , см	ΔY, см	ΔY, %	Z _{изм} , см	Z _{расч} , см	ΔZ, см	ΔZ, %
1	-28,4	-29,1	0,7	-2,3	-19,5	-19,3	-0,2	1,0	101,8	107,0	-5,2	-5,1
2	-21,5	-21,1	-0,4	1,7	-16,8	-15,6	-1,2	7,3	95,6	95,2	0,4	0,4
3	-14,7	-14,2	-0,5	3,6	-14,1	-12,8	-1,3	9,2	91,1	87,8	3,3	3,6
4	-7,3	-6,8	-0,5	7,1	-10,0	-9,4	-0,6	5,8	85,1	80,6	4,5	5,3
5	-0,3	-0,3	0,0	-0,2	-6,7	-6,4	-0,3	5,1	80,1	76,3	3,8	4,7
6	6,7	6,7	0,0	0,1	-3,3	-3,6	0,2	-6,8	73,2	70,1	3,1	4,3
7	58,0	58,6	-0,6	-1,0	24,5	24,0	0,5	2,0	257,0	254,0	3,0	1,2



Рис. 9. Изображения для расчёта положения объектов

Отснятые изображения приведены на рис. 9.

Эти изображения были обработаны следующим образом: найдены разностные изображения с фоновыми, на полученных изображениях определены контуры объектов, радиусы описанных окружностей, а также их центры. На рис. 10 линиями и окружностями обозначены обнаруженные объекты.

В верхней части рис. 10 приведено два числа – количество объектов в изображении камеры 2 и количество найденных трёхмерных объектов. Разница объясняется сдвигом поля зрения камер, что приводит к отсутствию в изображении камеры 1 объектов, видимых камерой 3, и наоборот.

В связи с этим для расчёта трёхмерных координат отбираются только объекты, видимые всеми тремя камерами.

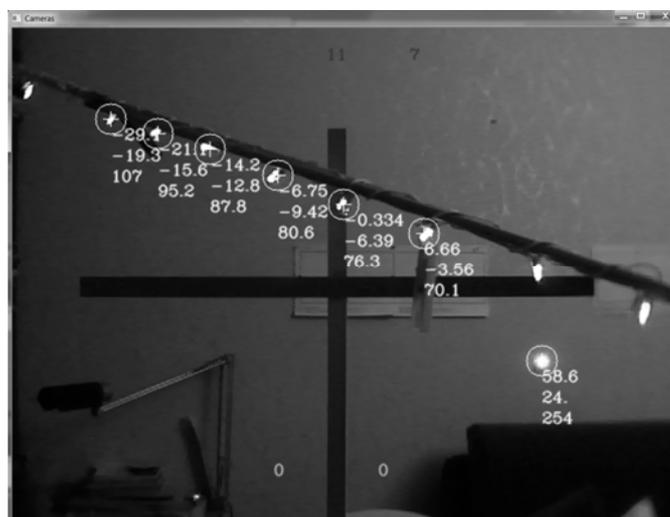


Рис. 10. Изображения со второй камеры с рассчитанными координатами объектов

Работа проводилась на компьютере с четырёхъядерным процессором Intel i7 частотой 3,2 МГц и ОЗУ 2,8 ГБ. При этом наблюдались явные «зависания» при обработке изображений с падением частоты кадров до 1 в секунду от исходных 30 кадров.

В результате расчёта получены следующие координаты объектов (табл. 1).

Следующим этапом эксперимента является проверка работы системы с движущимися объектами и определение их скорости. В связи с низким быстродействием имеющегося оборудования работа

была разделена на два этапа: запись видео с камер в реальном времени (30 кадров в секунду) с регистрацией времени съёмки и обработка полученного видео. Был снят видеофрагмент с падающей гирляндой, которая подтормаживалась подвесом таким образом, что скорость падения была равномерной (примерно 0,3 м/с для наиболее быстропадающей лампочки). При обработке результатов использовалось допущение о прямолинейности движения объектов. На рис. 11 показаны изображения объектов, полученные с камер, а на рис. 12 – их траектории.

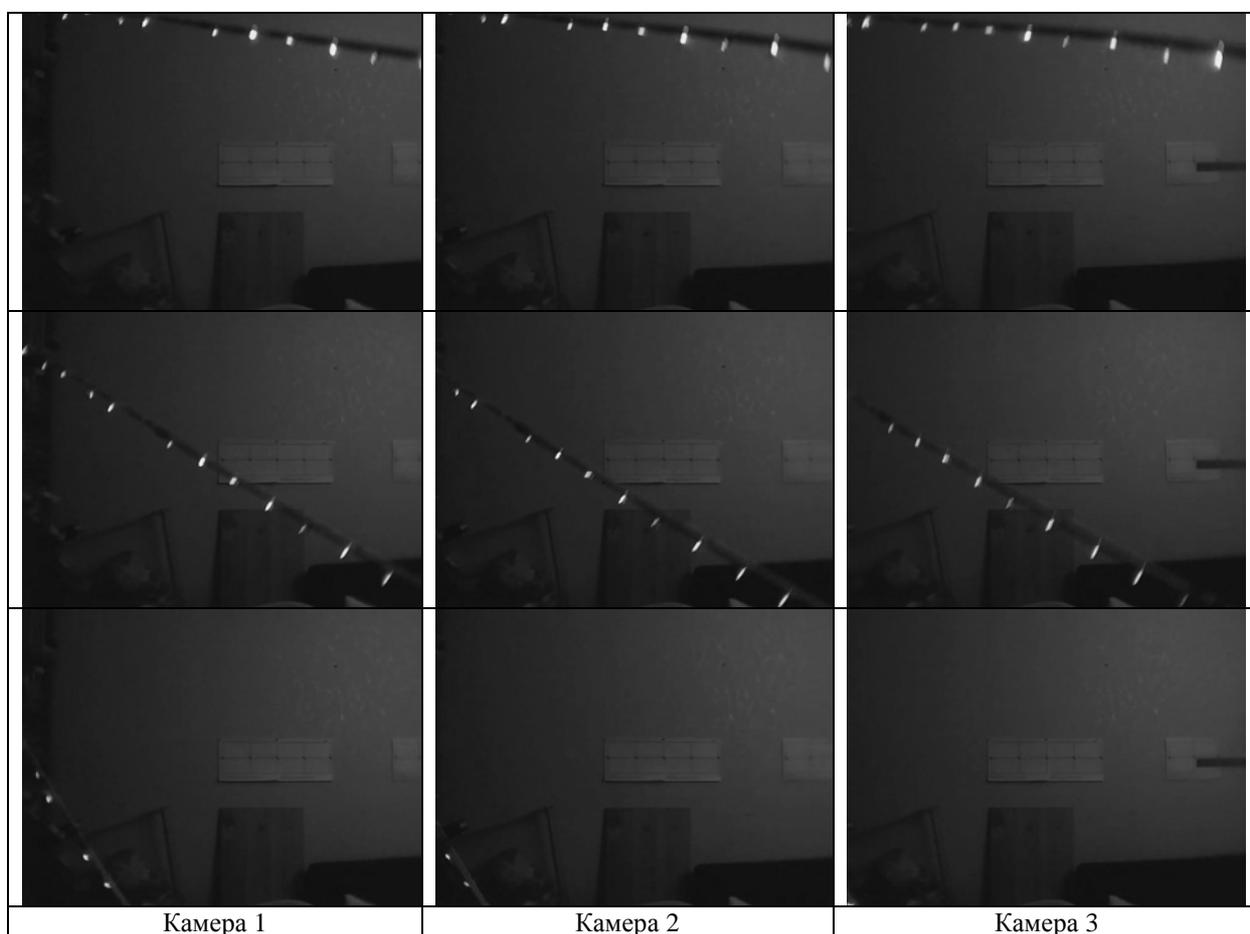


Рис. 11. Первый, средний и последний кадры видеофрагмента

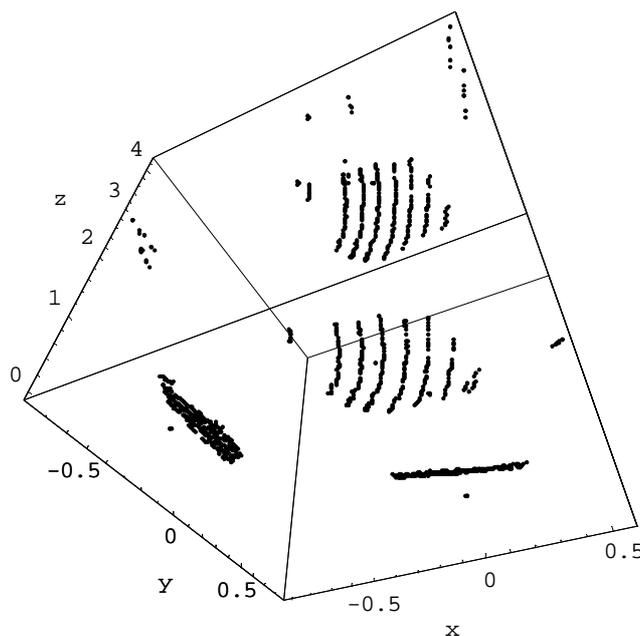


Рис. 12. Трек всех объектов, зарегистрированных системой
(на дальних стенках показаны проекции трека на координатные плоскости)

Для обработки выбирается определённая временная последовательность кадров:

1) в кадрах 1 и 2, а также 2 и 3 производится поиск объектов, наиболее близких по положению в пространстве по отношению к предыдущему кадру;

2) объединением пар кадров вычисляется скорость движения объекта, по прогнозу положения производится поиск объекта в 5-м кадре, а затем в 9-м кадре – по критерию, ближайшему к прогнозируемому;

3) производится удаление найденных объектов из исходных массивов;

4) производится поиск ближайших объектов в парах кадров 1 и 3, 3 и 5, поиск по прогнозу скорости в 9-м кадре, то есть регистрируются менее скоростные объекты, которым необходимо большее время для смещения;

5) затем в кадрах 11 и 12 идёт поиск ближайших объектов и по ранее набранным данным в данной паре кадров производится поиск объектов с наименьшим отклонением по прогнозу положения и направления вектора скорости;

6) работа по п.5 продолжается с парами кадров 21 и 22, 41 и 42, 81 и 82 и так далее до ухода объекта за пределы зоны видимости. При этом постоянно уточняется вектор скорости и трек объекта.

Данные алгоритмы отслеживания объектов существенно снижают требования к вычислительной мощности на данном этапе, позволяя обрабатывать не весь объём видеoinформации, а лишь отдельные кадры.

Как показано на рис. 13, системой длительно сопровождалось пять объектов, сведения о которых приведены в табл.2. При этом исходный трек объекта не полностью сопровожждён, что может быть исправлено подбором последовательности обрабатываемых кадров (в данном случае очередные кадры находились за пределами видеофрагмента). С другой стороны, при ограничении задачи регистрации объекта только замером его вектора скорости данная работа может быть излишней – и без этого видна довольно хорошая сходимость результатов вычислений модуля скорости с исходными данными.

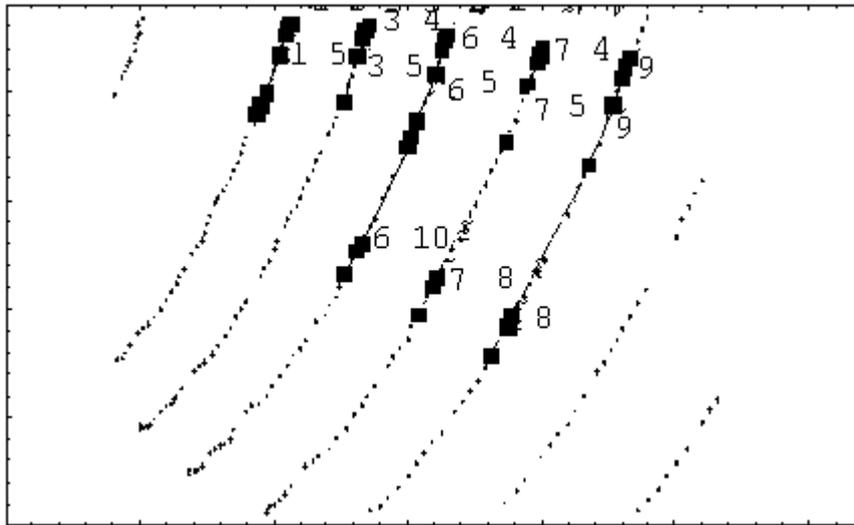


Рис. 13. Найденные системой треки объектов (обозначены квадратами с указанием номера объекта) на фоне общей картины треков

Таблица 2. Вычисленные значения модулей векторов скоростей объектов

N	Tнач, с	Tкон, с	V , м/с
9	0,14	1,029	0,38
7	0,14	1,029	0,34
6	0,14	1,029	0,33
3	0,14	0,452	0,29
1	0,14	0,576	0,26

Из рис. 13 также видно, что алгоритм не учитывает появление новых объектов, которые входят в поле зрения системы после начального набора данных.

Таким образом, проведённый эксперимент наглядно показывает работоспособность системы. Полученные при обработке результатов погрешности объясняются неточностью измерения координат в связи с большим размером объекта (светодиод) и, кроме того, по оси OZ дополнительно влияет методическая погрешность [5]. При этом явно видно, что быстроедействие современного компьютера существенно недостаточно для проведения измерений в реальном времени. Необходимо перенос определённых алгоритмов на аппаратный уровень.

Библиографический список

1. Семкин, Н.Д. Оптическая система сбора информации о пылевой компоненте космического аппарата и объектах космического мусора [Текст] / Н.Д. Семкин, Е.Ю. Барышев, А.М. Телегин // Прикладная физика. – 2010. – №1. – С. 94-100.
2. Пат. 58695 U1 Российская Федерация, МПК⁷G01C3/00. Детектор пылевых частиц [Текст] / Н.Д. Семкин, Е.Ю. Барышев; заявитель и патентообладатель Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). – № 2006120935/22; заявл. 13.06.2006; опубл. 27.1.2006, Бюл. № 26. – 2с.
3. Справочник по языку программирования C, <http://opencv.willowgarage.com/wiki>.
4. Сайт разработчиков робототехники, <http://robocraft.ru/page/opencv>.
5. Семкин, Н.Д. Бортовая оптическая система сбора информации об объектах космического мусора [Текст] / Н.Д. Семкин, Е.Ю. Барышев, А.М. Телегин // Аэрокосмическое приборостроение. – 2009. – №7. – С. 11-17.

EXPERIMENTAL SIMULATION OF REGISTRATION OF OUTER SPACE OBJECTS

© 2013 Ye. Yu. Baryshev, N. D. Syomkin, K. Ye. Voronov

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The article describes a mockup onboard system for the registration of outer space objects. The results of measuring the position and velocity vector of the objects obtained by the described installation are presented.

Dust particle, space debris, registration system, video camera, image processing, velocity vector of the object.

Информация об авторах

Барышев Евгений Юрьевич, ведущий инженер института космического приборостроения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: klop04@rambler.ru. Область научных интересов: космическое приборостроение.

Сёмкин Николай Данилович, доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: semkin@ssau.ru. Область научных интересов: высокоскоростной удар, масс-спектрометрия, космическое приборостроение.

Воронов Константин Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: voronov@ssau.ru. Область научных интересов: системы управления движением, физика высокоскоростного удара, космические исследования.

Baryshev Yevgeny Yuryevich, leading engineer of the institute of space device engineering, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: klop04@rambler.ru. Area of research: space device engineering.

Syomkin Nikolay Danilovich, doctor of technical science, professor, the department of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: semkin@ssau.ru. Area of research: high-speed impact, mass spectrometry, space device engineering.

Voronov Konstantin Yevgenyevich, candidate of technical science, associate professor, the department of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: voronov@ssau.ru. Area of research: motion control systems, physics of high-velocity impact, space research.