

УДК 535.31, 681.78

Н. С. Морев, Д. К. Кострин, В. А. Симон, А. А. Ухов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Исследование точности определения положения объекта с применением оптико-электронной системы наблюдения

Рассматривается возможность применения оптико-электронной системы наблюдения для определения местоположения объекта – расстояния до объекта и направления на него. В качестве метки на изображении, обеспечивающей определение положения объекта, используется геометрическая фигура, обладающая симметрией как минимум вдоль одной из осей. Для обработки изображений, поступающих с камеры, был разработан алгоритм, обеспечивающий как предварительную обработку данных (бинаризацию, удаление шумовой составляющей, выделение контуров фигур), так и последующий поиск метки заданной формы. В результате экспериментов было выявлено негативное влияние линзы, установленной на камере, на точность определения положения объекта при значительных взаимных углах между камерой и меткой. Эту ошибку измерения можно значительно уменьшить, если дополнительно ввести в алгоритм поправочные коэффициенты, определяемые свойствами используемой оптической системы.

Оптико-электронная система, искажение изображения, определение положения объекта, поиск меток

Развитие электроники привело к созданию различных многофункциональных автоматизированных систем для контроля и измерения физических величин, обработки сигналов и управления технологическими процессами [1]–[3]. Многие алгоритмы обработки данных могут быть выполнены с применением микропроцессорных систем или программируемых интегральных схем [4], однако наиболее сложные алгоритмы обработки данных (например, видеопотока) в режиме реального времени могут быть выполнены только с помощью полноформатных компьютерных систем [5], [6].

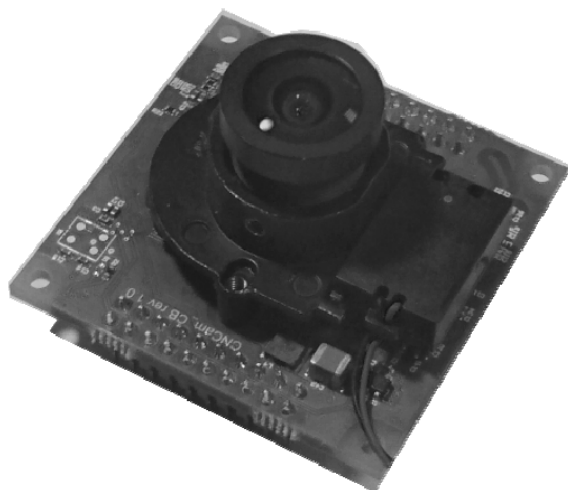
В последние годы вырос интерес к обработке видеоданных с целью создания различных электронных систем машинного (компьютерного) зрения [7]–[11]. Наиболее перспективные направления применения таких систем – это транспортные средства с возможностью автопилотирования, автоматизированные технологические и производственные системы, системы дополненной реальности.

Так как технологическое пространство на предприятии является средой, в общем, статичной и полностью подконтрольной, то с помощью

средств машинного зрения можно не только идентифицировать объекты, но и определять расстояние до них, а также направление на них (угол, под которым находится определенный объект по отношению к камере).

Для определения местоположения одного объекта относительно другого почти всегда возникает необходимость измерения расстояния между объектами и, возможно, измерения угла, под которым один объект расположен относительно другого или других объектов. Одним из ключевых шагов в решении данной задачи является выбор средства и метода измерения расстояния, в значительной степени определяемый условиями окружающей среды, типом объектов, между которыми проводится измерение, точностью измерений и экономическими соображениями.

Оптико-электронная система наблюдения. В данной работе рассматривается возможность применения оптико-электронной камеры для определения местоположения объекта. Матрица такой камеры – это пластина с большим количе-



а



б

Рис. 1

ством светочувствительных элементов, и именно от матрицы зависит качество изображения, получаемого в итоге. На сегодняшний день наиболее распространены матрицы на основе комплементарной структуры «металл–оксид–полупроводник» вследствие их большей технологичности и высокой степени интеграции в электронные устройства малых габаритов [12]. На рис. 1 представлены оптический модуль камеры с объективом (*а*) и внешний вид камеры в сборе (*б*).

К основным параметрам светочувствительной матрицы относятся:

- отношение сигнал/шум;
- чувствительность;
- разрешение;
- физический размер (формат);
- размер пикселя;
- количество пикселей.

Кроме светочувствительной матрицы к наиболее важным элементам камеры относится ее оптическая система. Сложность оптической системы камеры (объектива) в значительной степени обуславливает качество изображения и определяет значительную долю стоимости самой камеры. В наиболее простом представлении оптическая система камеры представляет собой собирающую линзу.

Общий подход к определению положения объекта с помощью камеры. Зная параметры светочувствительной матрицы (разрешение, размер матрицы или размер пикселя матрицы) и объектива (фокусное расстояние, искажение), можно рассчитать расстояние, на которое удален объект известных размеров относительно камеры, а также рассчитать направление на него.

Для определения расстояния между точкой съемки и объектом при помощи одной камеры в

первом приближении (без учета искажений изображения линзой и неидеальности матрицы камеры) необходимо выполнить несколько достаточно простых расчетов.

Если известен размер пикселя матрицы, то размер изображения объекта можно определить, умножив размер пикселя на количество пикселей, которое данное изображение занимает вдоль одного из направлений. Однако более точным методом будет расчет размера пикселя по вертикали и горизонтали исходя из размеров матрицы и ее разрешения, так как в некоторых случаях пиксель может иметь прямоугольную форму. Рассчитав количество пикселей, которое изображение занимает на матрице, и умножив данное количество на размер пикселя, можно получить размер изображения данного объекта на матрице и далее определить расстояние от объекта до камеры.

Расчет расстояния от камеры до объекта корректен при условии, что камера остается на одном горизонтальном уровне с объектом (для определения расстояния используется вертикальная составляющая размера объекта) либо на одном вертикальном уровне с объектом (для определения расстояния используется горизонтальная составляющая размера объекта). Данное ограничение может быть снято, если для определения расстояния использовать две разнесенных на определенное расстояние равнонаправленные камеры.

Если объект повернут под углом, его кажущийся размер будет равен размеру проекции данного объекта на ось x . Зная истинный размер объекта и размер изображения его проекции на матрице, можно рассчитать угол, под которым данный объект был запечатлен.

Алгоритм поиска метки на изображении. Камера служит эффективным средством определения местоположения объекта относительно точки съемки при определенных условиях [13]. Единственной сложностью остается нахождение заданного объекта на изображении.

В качестве метки используется геометрическая фигура, обладающая симметрией как минимум вдоль одной из осей. Почти все камеры для промышленного применения обладают матрицей, чувствительной к свету ближнего инфракрасного диапазона, поэтому в качестве метки используется геометрическая фигура на темном фоне, вершины которой сформированы инфракрасными светодиодами с широкой диаграммой направленности свечения. Геометрия фигуры метки выбирается с учетом уровня зашумленности снимка бликующими поверхностями. Размеры меток определяют диапазон расстояний их обнаружения, и чем сложнее геометрия фигуры метки, тем, как правило, медленнее выполняется алгоритм ее определения. На рис. 2 представлены два вида используемых меток.

Процесс определения местоположения заключается в нахождении заданной метки на изображении, определении ее геометрических параметров и расчете расстояния до нее и направления на нее (угла,

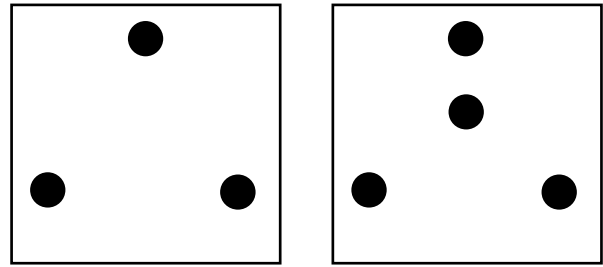


Рис. 2

под которым метка находится по отношению к камере). Для расчета расстояния и направления необходимо знать следующие параметры модуля: размер матрицы камеры, разрешение камеры, фокусное расстояние линзы, тип метки, реальные размеры метки (высота геометрической фигуры на метке и ширина этой фигуры). Все эти параметры в совокупности с видеосигналом с камеры служат входными данными для алгоритма определения местоположения метки относительно камеры.

Независимо от алгоритма поиска метки первоначально происходит предварительная обработка изображения, которая направлена на уменьшение шумовых составляющих на изображении с целью дальнейшего упрощения и ускорения поиска метки заданного типа (рис. 3).

Предварительная обработка [14] начинается с бинаризации изображения по высокому пороговому



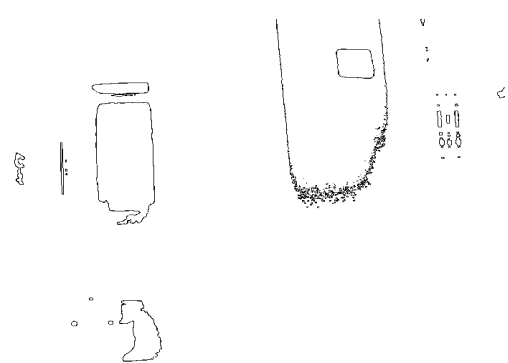
а



б



в



г

Рис. 3

значению интенсивности. Данная операция позволяет преобразовать исходное черно-белое изображение (изображение в градациях серого), представляющее собой совокупность различных интенсивностей черного цвета, в фактическое черно-белое изображение, у которого цвета с интенсивностью выше порогового значения преобразуются в белый цвет, а ниже – в черный. Дальнейший поиск метки на изображении в значительной степени упрощается, поскольку метка представляет собой четко выраженную совокупность точек (в общем случае – вершин геометрической фигуры) цвета высокой интенсивности на фоне, цвет которого имеет низкую интенсивность. На рис. 3, а представлено исходное изображение. Результат операции бинаризации изображения показан на рис. 3, б (изображение проинвертировано для лучшего визуального восприятия).

Вторым шагом предварительной обработки становится уменьшение размеров всех элементов на изображении той же интенсивности, что и точки метки, представляющих шум (следовательно, увеличение всех объектов на изображении той же интенсивности, что и фон), и дальнейшее увеличение размеров всех этих элементов. Таким образом, мельчайшие точки, представляющие шум, исчезают, а остальные, которые с большей вероятностью принадлежат метке, оказываются более выражены (рис. 3, в). Заключительным шагом предварительной обработки изображения становится нахождение контуров всех элементов (рис. 3, г).

Далее контуры, полученные на этапе предварительной обработки, сортируются следующим образом: первым элементом отсортированного списка становится контур, центр масс которого находится на изображении ниже всего, вторым элементом – контур, центр масс которого следует сразу после первого, и т. д. Суть алгоритма поиска метки заключается в поочередном переборе контуров в отсортированном списке и проверке наличия определенных свойств у контуров и геометрических фигур, вершины которых данные контуры могут формировать. Поиск метки происходит до тех пор, пока не будет пройден весь список отсортированных контуров. Таким образом, если на изображении находится несколько меток, то все они будут найдены.

Исследование точности определения положения объекта. Проверка эффективности работы системы, т. е. алгоритма поиска меток заданного типа на изображении и определения расстояния до них и направления на них, осуществлялась посредством сравнения реального расстояния от камеры до метки и реального направления на метку (угла, под которым метка расположена относительно ка-

меры) с расстоянием и направлением, рассчитанными программой. Высота исследуемой метки составляла 140 мм, ширина – 160 мм. На рис. 4 представлен график зависимости ошибки определения расстояния от камеры до метки ε_r от реального расстояния L .

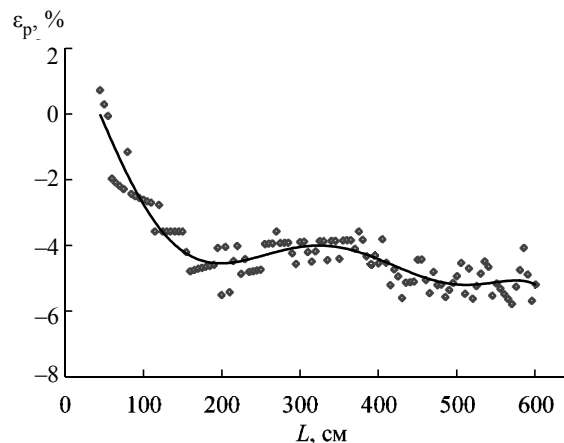


Рис. 4

Погрешность определения расстояния минимальна при минимальном расстоянии между меткой и камерой, а по мере увеличения расстояния ошибка увеличивается и после определенного значения расстояния колеблется в небольшом диапазоне значений погрешности. Это может быть обусловлено неидеальностью параметров матрицы (например, реального разрешения или формата) и искажающим воздействием линзы оптической системы.

Ошибку можно значительно уменьшить, если ввести поправочные коэффициенты, значение которых пропорционально рассчитанному без поправочных коэффициентов расстоянию (диапазону расстояний, в который оно попало).

На рис. 5 представлен график зависимости значения ошибки в определении направления ε_y от реального направления (угол α) на метку для трех значений расстояния от метки до камеры L (1 – 100 см; 2 – 200 см; 3 – 400 см).

Для значения угла $\alpha = 0^\circ$ ошибка составляет 100 % для всех значений расстояний. Для диапазона значений угла $\alpha = 0...10^\circ$ определялось значение угла в диапазоне $7...12^\circ$. Погрешность определения направления также в значительной степени обусловлена неидеальностью матрицы камеры и искажением линзы. С увеличением значения угла α погрешность определения направления уменьшается независимо от расстояния. На рис. 6 представлен пример искажения изображения собирающей линзой (d, d_n – расстояния между точками неискаженного и искаженного изображений).

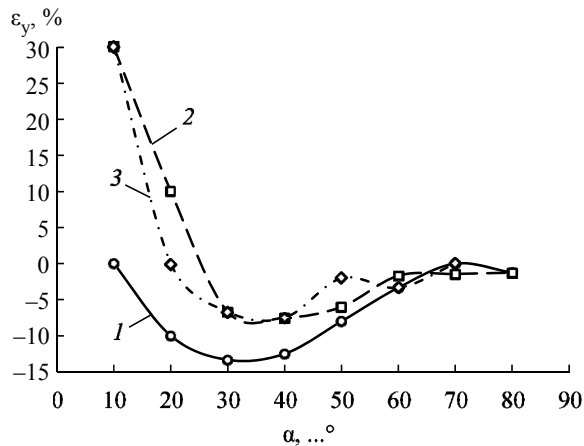


Рис. 5

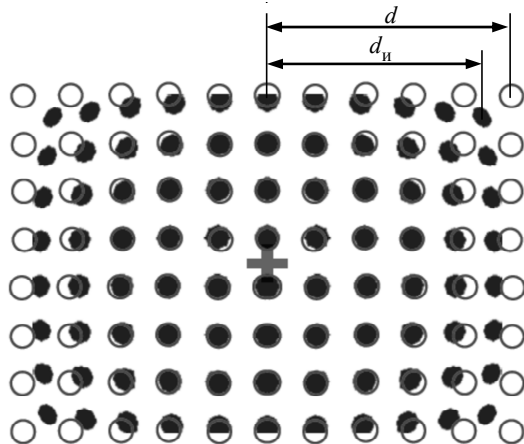


Рис. 6

Такая линза позволяет получать изображение в широком угловом диапазоне, при этом реальное расстояние между двумя близко расположенными точками уменьшается от центра к периферии, а следовательно, погрешность определения реального расстояния между двумя точками на изображении увеличивается с ростом расстояния между этими точками. Вследствие различия размеров матрицы камеры и того, на который рассчитана данная линза, искажения изображения по вертикали и горизонтали различны. При положении метки под прямым углом по отношению к

камере вследствие искажения изображения линзой возникают погрешности в определении расстояния и угла, под которым находится камера по отношению к метке. В общем случае определяемое расстояние пропорционально расстоянию между двумя определенными точками на матрице по вертикали, а угол — прямо пропорционален расстоянию между двумя определенными точками на матрице по горизонтали и обратно пропорционален определяемому расстоянию до метки. При уменьшении угла расстояние по горизонтали между двумя точками метки, проецируемое на матрицу, уменьшается, а расстояние по вертикали между двумя точками метки, проецируемое на матрицу, остается неизменным, а следовательно, погрешность определения расстояния между метками тоже уменьшается. Как следствие, общая погрешность определения угла с увеличением угла также уменьшается.

Результаты проведенных исследований подтверждают эффективность применения оптико-электронной системы наблюдения для определения положения объекта. В рамках работы был проведен анализ процесса поиска меток на изображении с применением разработанного алгоритма, позволяющего оценить расстояние от камеры до метки, а также угол поворота метки на изображении. В результате экспериментов установлено негативное влияние линзы, установленной на камере, на точность определения положения объекта при значительных взаимных углах между камерой и меткой. Эту ошибку измерения можно значительно уменьшить, если дополнительно ввести в алгоритм поправочные коэффициенты, определяемые свойствами используемой оптической системы.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218, договор № 03.G25.31.0256.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нырков А. П., Соколов С. С., Шнуренко А. А. Автоматизированное управление транспортными системами. СПб.: Изд-во Гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2013. 325 с.
2. Асмаев М. П., Пиотровский Д. Л., Рябов А. И. Автоматизированное управление в технических системах. Краснодар: Изд-во Кубанского гос. технологического ун-та, 2002. 530 с.
3. Кострин Д. К., Лисенков А. А., Ухов А. А. Электронные средства контроля технологических процессов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 228 с.
4. Грушвицкий Р. И., Мурсаев А. Х., Угрюмов Е. П. Проектирование систем на микросхемах программируемой логики. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. 608 с.
5. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде Matlab. М.: Техносфера, 2006. 616 с.
6. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В. Обработка сигналов и изображений. СПб.: Питер, 2002. 608 с.
7. Дятлов Е. И. Машинное зрение // Математические машины и системы. 2013. № 2. С. 32–40.
8. Колочкин В. Я., Нгуен К. М., Чан Т. Х. Алгоритмы обработки изображений в системах машинного зрения роботизированных производственных линий // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2014. № 3. С. 44–51.
9. Никитина О. И., Евсеенкова А. Ю. Машинное зрение: цели, задачи и область применения // Информационная среда вуза. 2015. № 1. С. 388–393.

10. Телевизионные технологии распознавания биологических объектов / Д. К. Кострин, А. А. Ухов, В. Б. Бессонов, В. А. Герасимов, Л. М. Селиванов, М. В. Лавреев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2013. № 6. С. 27–32.

11. Система управления роботами на подвижном основании / М. М. Копычев, А. В. Путов, В. В. Путов, К. В. Игнатьев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 5. С. 55–60.

12. Белобородов А. В., Малофеев Д. А., Фиононов Л. В. Цифровые КМОП камеры для промышленного применения // Датчики и системы. 2011. № 8. С. 49–52.

13. Лачугин Д. В., Егоров И. В. Оптимизация параметров системы технического зрения на базе трех камер // Вестн. Саратовского гос. техн. ун-та. 2012. № 64, ч. 2. С. 393–397.

14. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. М.: Техносфера, 2009. 856 с.

N. S. Morev, D. K. Kostrin, V. A. Simon, A. A. Uhov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

ANALYSIS OF THE ACCURACY OF DETERMINING POSITION OF AN OBJECT USING AN OPTOELECTRONIC SURVEILLANCE SYSTEM

Considers the possibility of using an optoelectronic surveillance system to determine the location of an object – distance to the object and the direction to it. A geometric shape that has symmetry along at least one of the axes is used as a tag in the image to determine the position of an object. To process images coming from the camera, an algorithm was developed that provides both preprocessing of data (binarization, removal of noise component, selection of shape contours) and the subsequent search for a tag of a given shape. As a result of the experiments, the negative influence of the lens mounted on the camera on the accuracy of determining the position of an object at significant mutual angles between the camera and the tag was revealed. The value of this measurement error can be significantly reduced if the correction factors determined by the properties of an optical system used are additionally introduced into the algorithm.

Optoelectronic system, distortion of an image, determination of the object position, search for tags
