ИКОНИКА – НАУКА ОБ ИЗОБРАЖЕНИИ

УДК 621.384.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕСКОЛЬКИХ ВИДЕОСЕНСОРОВ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ

© **2007 г.** **А. О. Егоров**; **В. Я. Колючкин**, доктор техн. наук; **Л. Н. Тимашова**, канд. техн. наук

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

E-mail: alexx-egorov@yandex.ru

Рассмотрена возможность использования нескольких видеосенсоров в системах контроля геометрических параметров объектов, когда количество пикселов или быстродействие одного сенсора не могут обеспечить требуемые характеристики системы. Предложена методика калибровки, а также приведен пример расчета погрешности таких систем.

Коды OCIS: 120.0120.

Поступила в редакцию 30.05.2007.

Последнее время все более широкое применение в оптико-электронных системах (ОЭС) измерительного типа находят видеосенсоры. С их помощью можно определять изменяющиеся во времени геометрические параметры объектов, участвующих в различных технических процессах. Например, проецируя на поверхность объекта лежащую в некоторой плоскости светящуюся полосу и регистрируя изображение полосы с помощью видеосенсора, можно определить геометрические параметры соответствующего сечения поверхности объекта. Такой метод, называемый методом световых сечений, можно применить ко многим объектам, поверхность которых подлежит измерению или контролю, – от элементов корпусных конструкций в авиационной и космической промышленности до трубопроводов и тоннелей в архитектуре и строительстве. Пример принципиальной схемы ОЭС для измерения контура внутренней поверхности протяженного объекта в различных сечениях представлен на рис. 1.

Погрешность δ таких систем определяется изменением координат точек сечения поверхности, которое невозможно обнаружить вследствие дискретизации изображения в видеосенсоре, –

$$\delta = kSa_{эл}/f', \qquad (1)$$

где S – расстояние от главной плоскости объектива до плоскости анализа, f' – фокусное расстояние объектива, $a_{эл}$ – размер элемента сенсора, k – коэффициент, зависящий от алгоритма вычисления координат точек изображения светящейся полосы.

При этом количество элементов сенсора, соответствующее максимальному размеру сечения поверхности D,

$$N_{эл} = Df'/(Sa_{эл}). \qquad (2)$$

Таким образом, погрешность системы определяется отношением максимального размера сечения поверхности к количеству элементов видеосенсора, соответствующему этому размеру, т. е.

$$\delta = kD/N_{эл}. \qquad (3)$$

Следовательно, минимальную погрешность можно получить, когда при максимальном размере сечения поверхности его изображение занимает максимальную площадь видеосенсора.

Так, применяя метод световых сечений для контроля внутренней поверхности железнодорожных тоннелей с помощью ОЭС, упрощенная схема которой показана на рис. 1, удалось при максимальной

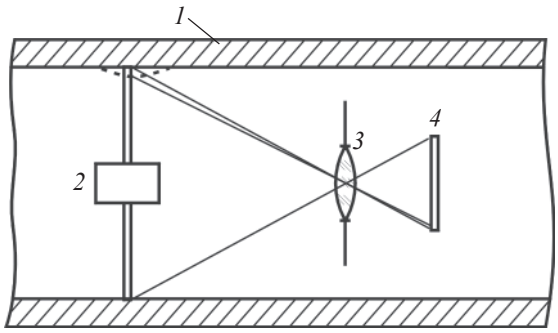


Рис. 1. Принципиальная схема ОЭС для измерения контура внутренней поверхности объекта. *1* – объект, *2* – блок подсветки, *3* – оптическая система, *4* – видеосенсор.

ном размере сечения D = 9000 мм получить погрешность не более ± 3,5 мм. В этой ОЭС применялась ПЗС-матрица с количеством элементов 1300×1024, тогда как наиболее распространены и доступны ПЗС-матрицы с количеством элементов порядка 500×582. Такое количество элементов обусловлено возможностью получения кадровой частоты $f_{\text{кадр}}$ = 25 Гц, применяемой в видеосистемах PAL/SECAM, и является оптимальным. С увеличением числа элементов уменьшается технически достижимая кадровая частота и для ПЗС-матрицы с количеством элементов 1300×1024 она составляет $f_{\text{кадр}}$ = 7,5 Гц. Между тем от кадровой частоты зависит расстояние между соседними регистрируемыми сечениями внутренней поверхности тоннеля

$$\Delta S = V/f_{\text{кадр}}. \qquad (4)$$

Таким образом, при номинальной скорости следования порядка V = 20 м/с (72 км/ч) это расстояние равно 2,7 м. В таком случае система может пропустить значительные по размеру дефекты, что впоследствии может привести к аварийной ситуации.

Для уменьшения расстояния между регистрируемыми сечениями можно либо уменьшить скорость следования тоннелеобследовательской станции (ТОС), либо использовать более распространенную ПЗС-матрицу с кадровой частотой $f_{\text{кадр}}$ = 25 Гц. В последнем случае при анализе каждого из полукадров, следующих с частотой $f_{\text{полукадр}}$ = 50 Гц, можно получить расстояние между соседними регистрируемыми сечениями, равное 0,4 м. С учетом природы возникновения дефектов внутренней поверхности тоннелей такое значение является приемлемым.

Между тем, чтобы получить такое же расстояние между соседними регистрируемыми сечениями, используя ПЗС-матрицу с кадровой частотой $f_{\text{кадр}}$ = 7,5 Гц, необходимо уменьшить скорость следования ТОС до 3 м/с (11 км/ч). Это требует внесения существенных корректив в напряженный график следования поездов по контролируемым участкам пути, тогда как использование стандартного видеосигнала с полукадровой частотой $f_{\text{полукадр}}$ = 50 Гц позволяет ТОС работать в сцепке с любым железнодорожным составом, не внося никаких изменений в график следования.

С другой стороны, если ПЗС-матрицу с количеством элементов 500×582 использовать как элемент ОЭС, упрощенная схема которой показана на рис. 1, погрешность системы увеличивается до ± 9 мм. Кроме того, из-за влияния дисторсии широкоугольного объектива, необходимого для обзора всей области анализа, эта величина на практике оказывается еще больше, так как весь контур регистрируемого сечения приходится на край поля.

Следует отметить, что все более развивающаяся технология КМОП (CMOS) [1] позволяет производить видеосенсоры с бóльшим количеством элементов при бóльших кадровых частотах, но тем не менее, очевидно, что может возникнуть ситуация, когда контролируемый объект имеет большие угловые размеры и подлежит точному контролю с высокой частотой измерений. В таком случае при использовании даже самой современной элементной базы одновременное обеспечение необходимого быстродействия и допустимой погрешности такой системы является нетривиальной задачей.

Решение проблемы состоит в разбиении контура сечения такого объекта на зоны, каждая из которых регистрируется отдельным видеосенсором, так что любая точка контура всегда находится в поле хотя бы одного сенсора. Для гарантированного выполнения этого условия необходимо незначительное наложение полей соседних сенсоров в плоскости анализа.

Кроме того, разбиение контура на зоны позволяет ориентировать поле каждого видеосенсора таким образом, чтобы изображение любого участка сечения пересекало строки соответствующего сенсора под углом, максимально приближенным к 90°. Это обеспечивает применимость простейших алгоритмов вычисления координат точек изображения контура сечения, например, определения в каждой строке сенсора элемента с максимальной освещенностью.

Еще одно преимущество применения нескольких сенсоров состоит в возможности преобразования поля каждого из них с помощью призм и анаморфотной оптики для наиболее эффективного решения конкретной задачи. Например, в случае ТОС допустимая погрешность в радиальном направлении составляет 10 мм, а в тангенциальном – 100 мм. Тогда, чтобы обеспечить более жесткие требования в радиальном направлении, желательно иметь поле анализа, соответствующее допустимому диапазону изменения формы сечения тоннеля, и не более того. В таком случае в соответствии с формулой (3) система будет обеспечивать наименьшую погрешность. С другой стороны, при обычном соотношении размеров сенсора по строке и столбцу (4:3) размер поля анализа с обыкновенным объективом составит в тангенциальном направлении 75% от его размера в радиальном направлении. Но требования к погрешности в тангенциальном направлении в 10 раз ниже, чем в радиальном. Поэтому, “растянув” поле анализа в тангенциальном направлении так, чтобы оно соответствовало относительно низким требованиям к точности, можно сэкономить существенное количество видеосенсоров.

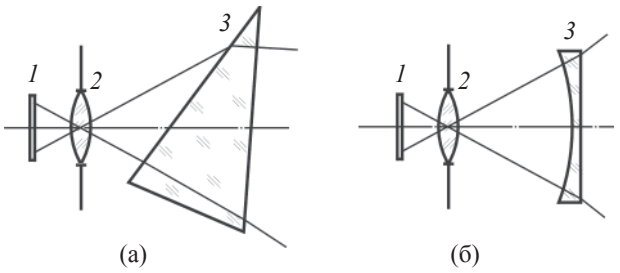


Рис. 2. Трансформация поля анализа видеосенсора. *1* – сенсор, *2* – объектив, *3* – трансформирующий элемент (пояснения в тексте).

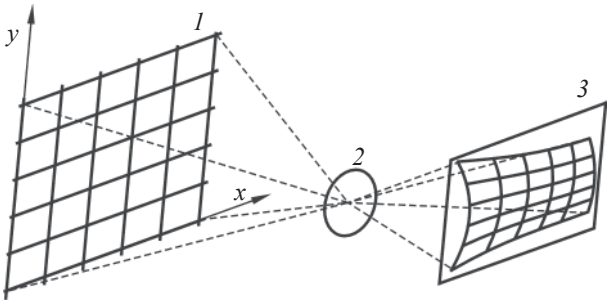


Рис. 3. Схема калибровочного стенда. *1* – плоскость анализа, *2* – оптическая система, *3* – видеосенсор.

Применительно к существующей ТОС поле анализа каждого сенсора уменьшено призмой (рис. 2а) в радиальном направлении для уменьшения погрешности, а также увеличено цилиндрической линзой (рис. 2б) в тангенциальном направлении для экономии видеосенсоров.

В результате такой трансформации и без того искаженного дисторсией изображения определить для каждого элемента сенсора координаты соответствующей точки контролируемого сечения объекта довольно сложно. Эта проблема решается путем тщательной калибровки системы [2].

Следует отметить, что для получения минимальной погрешности желательно проводить калибровку в единой системе координат всех окончательно зафиксированных для работы видеосенсоров. Для этого изготавливается специальный калибровочный стенд, позволяющий предъявлять сенсорам точно закоординированные точки во всем рабочем диапазоне плоскости анализа, чтобы по координатам их изображений вычислить все необходимые параметры для установления однозначного соответствия между координатами в плоскости сенсора и в плоскости анализа. В этом случае общая погрешность системы складывается из погрешности изготовления стенда $\delta_{ис}$, погрешности определения координат точек изображения $\delta_{ок}$ при калибровке, погрешности калибровочных вычислений $\delta_{кв}$ и погрешности определения координат точек изображения $\delta_{ок}$ при работе системы [3]

$$\delta = \sqrt{\delta_{ис}^2 + \delta_{кв}^2 + 2\delta_{ок}^2}. \qquad (5)$$

Однако в случае ТОС с размером рабочей области плоскости анализа 9000×7000 мм^2 изготовление подобного калибровочного стенда и применение его на участке железнодорожного полотна с непредсказуемыми погодными условиями является затруднительным. Поэтому было принято решение проводить калибровку каждого видеосенсора в связанной с ним системе координат, а затем пересчитывать полученные координаты в единую систему в зависимости от положения конкретного сенсора. В таком случае калибровочный стенд, показанный на рис. 3, имеет размеры, соответствующие полю анализа одного сенсора, и используется в лабораторных условиях.

Если видеосенсор имеет m строк по n чувствительных элементов, то изображение некоторой вертикальной линии $x = a$, находящейся в поле анализа сенсора, попадает в i-й строке на чувствительный элемент с номером $j_i^{x=a}$, где $i = 0, \ldots, (m-1)$, $j_i = 0, \ldots, (n-1)$. Очевидно, что изображение другой вертикальной линии $x = b$ попадает в той же i-й строке на чувствительный элемент с номером $j_i^{x=b}$. Определив по изображениям нескольких вертикальных полос значения j_i^x, где $x = a, b, c, d$ и т. д., осуществляем интерполяцию функции $x_i(j)$ по известным значениям $x_i(j_i^{x=a}) = a$, $x_i(j_i^{x=b}) = b$ и т. д. [4], находя тем самым однозначное соответствие номера j чувствительного элемента i-й строки и горизонтальной координаты $x_i(j)$ точки в плоскости анализа. Так как номер чувствительного элемента дискретная величина от 0 до $(n-1)$, то получаем матрицу X размером $m \times n$, где любое значение $X_{i,j}$ – это горизонтальная координата точки в плоскости анализа, изображение которой попадает на j-й элемент i-й строки сенсора.

Определив в результате аналогичных действий с горизонтальными линиями и их изображениями матрицу Y размером $m \times n$, находим однозначное соответствие между чувствительными элементами сенсора и координатами точек контролируемого сечения.

При монтаже видеосенсоров на ТОС юстировочными подвижками добиваются их пространственного расположения относительно плоскости анализа, соответствующего условиям калибровки, наблюдая изображения нескольких точно закоординированных марок. Монтаж сенсора считается правильным, если изображения этих марок попадают на чувствительные элементы в соответствии с калибровочными матрицами X и Y.

Таким образом, дополнительные операции при калибровке и монтаже сенсоров несколько увели-

чивают общую погрешность системы. Теперь она складывается из погрешности изготовления стенда $\delta_{ис}$, погрешности определения координат точек изображения $\delta_{ок}$ при калибровке, погрешности калибровочных вычислений $\delta_{кв}$, погрешности монтажа $\delta_{м}$ и погрешности определения координат точек изображения $\delta_{ок}$ при работе системы. Поскольку погрешность монтажа определяется погрешностью определения координат точек изображения $\delta_{ок}$ при наблюдении изображений марок в плоскости анализа, то окончательное выражение для расчета погрешности имеет вид

$$\delta = \sqrt{\delta_{ис}^2 + \delta_{кв}^2 + 3\delta_{ок}^2}. \qquad (6)$$

В заключение следует отметить, что, применяя описанную методику к тоннелеизмерительной станции, при $\delta_{ис} = \pm 1$ мм, $\delta_{кв} = \pm 1$ мм и $\delta_{ок} = \pm 3$ мм удалось получить общую погрешность $\delta = \pm 5$ мм в рабочей области 9000×7000 мм^2, что было подтверждено при проведении натурных испытаний системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
2. *Форсайт Д., Понс Ж.* Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004. 928 с.
3. *Тейлор Дж.* Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985. 272 с.
4. *Демидович Б.П., Марон И.А.* Основы вычислительной математики. М.: Наука, 1966. 664 с.