



## ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ НА ФОНЕ ПОМЕХ

**Е. В. ШАПОВАЛОВ**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

*Рассмотрен общий подход к задаче разработки алгоритмического обеспечения систем технического зрения, которые могут использоваться для принятия решений о состоянии исследуемого объекта. Предложены высокопроизводительные алгоритмы обработки цифровых изображений в лазернотелевизионных сенсорных системах, предназначенных для бесконтактного сбора диагностических данных о геометрических параметрах железнодорожного пути.*

*A general approach to the problem of development of algorithmic support of machine vision systems is considered, which can be used to take decisions on the examined object condition. High-efficient algorithms are proposed for digital image processing in laser TV sensor systems designed for contactless acquisition of diagnostic data on geometrical parameters of the railway tracks.*

Техническое зрение давно привлекает внимание специалистов, занимающихся исследованиями и разработками в области искусственного интеллекта. Для реализации механизмов принятия решений необходимы входные данные, которые могут предоставляться с помощью систем технического зрения (СТЗ), действующих в качестве регистраторов информации о текущем состоянии исследуемого объекта.

Последовательность обработки видеосигналов в СТЗ состоит из этапов формирования, сегментации, описания и анализа изображений. Изображения рассматриваются как двумерные цифровые сигналы. На этапе формирования изображения осуществляется взаимодействие с аппаратными средствами, предназначенными для регистрации входного видеосигнала. При этом выполняется линейное и нелинейное усиление сигнала, смещение нулевого уровня и другие преобразования, обеспечивающие требуемые амплитудно-частотные характеристики и отношение сигнал-шум. После регистрации выполняется предварительная обработка изображения, которая может включать следующие операции: снижение уровня шумов с помощью цифровой фильтрации и сглаживания; улучшение визуального качества изображений путем преобразования шкалы интенсивности, обострения перепадов и подчеркивания границ; бинаризация и другие вспомогательные математические операции над изображением (дифференцирование, логическое сравнение и т. п.). На этапе сегментации изображений выполняется декомпозиция рабочей области на отдельные фрагменты, выделение контуров, нахождение однородных областей и выделение типичных особенностей изображений. Этап описания изображений связан с решением задач расчета количественных характе-

ристик (признаков) объектов, определения качественных признаков для классификации объектов, оценки местоположения и ориентации объектов на изображении. На последнем этапе обработки изображения выполняется распознавание образов или классификация объектов с последующим анализом полученных результатов. В случаях, когда осуществляется контроль геометрических параметров или взаимного положения объектов, необходимо выполнять преобразование экранных координат найденных точек объекта в некоторую глобальную метрическую систему координат.

На сегодня создан достаточно мощный математический аппарат обработки изображений. Разработано множество методов и алгоритмов, связанных с применением цифровой обработки сигналов для улучшения визуального качества изображений [1]. Предлагается значительное количество методов анализа и проектирования цифровых фильтров, применяемых для снижения уровня шумов на изображениях [2]. Существует множество подходов к решению задач, связанных с дискретизацией, фильтрацией, сегментацией изображений и выделением контуров объектов [3]. Разработаны эффективные в вычислительном отношении быстрые алгоритмы свертки и медианной фильтрации изображений [4]. Существуют установившиеся методы и алгоритмы, связанные с классификацией объектов и распознаванием образов [5]. Вместе с тем не существует некоторого стандартного набора методов и алгоритмов, который бы позволил построить универсальную СТЗ. Алгоритмы обработки видеосигналов зависят от типа используемого оптического датчика и особенностей конкретной задачи, возложенной на систему. Также на алгоритмы обработки изображений накладывается еще одно существенное ограничение, связанное с их быстродействием



при программной реализации. Время обработки изображения не должно превышать период обновления кадров в оптической системе. При этом необходимо учитывать, что вычислительный блок СТЗ должен не только обрабатывать видеосигнал, но и взаимодействовать с внешними устройствами путем приема-передачи управляющих и информационных сигналов, что также требует определенных вычислительных затрат. Таким образом, при разработке математического обеспечения СТЗ необходимо решать задачу формирования набора методов и алгоритмов, позволяющего наиболее эффективно решать поставленную задачу с обеспечением необходимого быстродействия при программной реализации.

В настоящее время широкое распространение получили триангуляционные СТЗ, основанные на линейном структурированном подсвете поверхности объекта. Излучение точечного источника, чаще всего лазерного, разворачивается в плоскость с помощью цилиндрической оптики или колеблющегося зеркала. При пересечении световой плоскости с поверхностью объекта формируется световой след, повторяющий рельеф поверхности. Видеокамера, расположенная под некоторым триангуляционным углом к световой плоскости, регистрирует изображения светового следа, в результате обработки которых могут определяться необходимые геометрические параметры и относительное смещение объекта. В дополнение к бесконтактности и безынерционности к преимуществам таких СТЗ также относится высокое отношение сигнал-шум в исходном сигнале.

Несмотря на все преимущества СТЗ, основанных на лазерной триангуляции, их надежность в основном определяется применяемыми алгоритмами обработки изображений, т. е. элементами внедренного искусственного интеллекта. Алгоритмическое обеспечение СТЗ должно решать следующие основные задачи:

- обнаружение контура светового следа на изображении;
- выделение полезного сигнала на фоне возможных помех;
- определение характерных точек объекта.

Обнаружение контура светового следа является одной из самых ресурсоемких операций, поскольку требует обработки двумерного массива точек изображения. Следовательно, при разработке соответствующего алгоритма необходимо стремиться максимально возможно повысить его быстродействие. Обнаруженный контур светового следа представляет собой массив точек, который может содержать как полезный сигнал, так и помехи. Под выделением полезного сигнала понимается выбор из массива только тех точек, которые соответствуют поверхности исследуемого объекта. В качестве характерных выступают точ-

ки, относительно которых необходимо определять размеры или смещение объекта.

В качестве примера рассмотрим построение алгоритмического обеспечения лазерно-триангуляционной СТЗ, предназначенной для измерения относительного смещения железнодорожного рельса. Несколько таких СТЗ, установленных на раме путеизмерительного вагона, могут обеспечить бесконтактное измерение трех из четырех основных параметров рельсового пути, а именно ширину колеи и стрелы изгиба рельсов в горизонтальной и вертикальной плоскостях [6]. Их преимущества перед контактными датчиками, которые в основном используются на путеизмерительных вагонах, очевидны. Это и отсутствие износа контактирующих деталей, и безынерционность, и более высокая точность измерения. Вместе с тем рельсовая колея характеризуется наличием значительного количества механических помех, которые могут негативно влиять на работу СТЗ. В рабочую зону устройств регистрации оптического излучения кроме рельсов могут попадать элементы рельсовых креплений, переездов, стрелочных переводов, снег, растительность или другие посторонние предметы. В основном именно эти обстоятельства и препятствуют широкому распространению СТЗ на путеизмерительной технике. Также присутствуют экономические причины, связанные с высокой стоимостью СТЗ, которая определяется требуемой вычислительной мощностью устройств обработки изображений. Снизив требования к мощности вычислительных устройств, можно добиться существенного снижения стоимости СТЗ.

Световой след на цифровых изображениях представлен в виде пикселей с более высокой яркостью (интенсивностью) по сравнению с окружающим фоном (рис. 1, а). В общем случае фоновый шум является нестационарным с априорно неизвестным законом распределения вероятностей. Таким образом, для обнаружения контура светового следа на цифровых изображениях целесообразно использовать согласованно избирательный фильтр (СИФ) с последующим анализом максимальных откликов фильтра [7]. Основное отличие СИФ от оптимальных (согласованных) фильтров заключается в том, что для синтеза его структуры нет необходимости в априорной информации о конкретных изображениях окружающего объект фона. Задача обнаружения нитевидных объектов, к которым относится световой след, в основном решается с помощью одномерных СИФ. Использование одномерных СИФ позволяет существенно повысить быстродействие алгоритмов обработки изображений по сравнению с двумерной фильтрацией. Выходным сигналом одномерного СИФ является результат дискретной свертки значений яркости пикселей, соответствующих столбцу



(строке) исходного изображения, с импульсной функцией:

$$y(i) = \sum_{n=-b/2}^{b/2} x(i+n)h(n),$$

где  $y$  — результат свертки;  $x$  — яркость пикселя исходного изображения;  $b$  — база фильтра;  $i$  — номер строки изображения;  $h$  — импульсная характеристика СИФ.

Расчет импульсной характеристики СИФ выполняется в соответствии со следующей формулой:

$$h(n) = 2s(t-1-n) - s(t-2-n) - s(t-n),$$

где  $t$  — количество значащих элементов импульсной функции СИФ;  $s$  — идеализированный импульс яркости в виде нормированной функции, описывающей распределение яркости пикселей вдоль столбцов изображения в области светового следа;  $n$  — номер элемента идеализированного импульса яркости  $s$ .

Анализ тестовых изображений светового следа показал, что идеализированный импульс яркости  $s$  в достаточной мере соответствует равнобедренной трапеции. Полученная формула СИФ фильтра без учета нормирующего коэффициента имеет следующий вид:

$$y(i) = -x(i-l_2/2) + x(i-l_1/2) + x(i+l_1/2) - x(i+l_2/2),$$

где  $l_1, l_2$  — длины верхней и нижней основ трапеции, описывающей идеализированный импульс яркости  $s$ .

Таким образом, синтезированный СИФ имеет достаточно высокую вычислительную эффективность. Для вычисления отклика фильтра достаточно выполнить всего лишь три простые арифметические операции.

Для принятия решения о принадлежности точки  $(i_{max}, j)$ , соответствующей максимальному отклику фильтра  $y_{max}$  в  $j$ -м столбце, используется пороговое сравнение:

$$(i_{max}, j) \in c, y_{max} > \bar{y} + k_e \sigma_y,$$

где  $\bar{y}, \sigma_y$  — оценки математического ожидания (среднее значение) и дисперсии (среднеквадрати-

ческое отклонение) откликов СИФ;  $c$  — массив точек контура;  $k_e$  — экспериментальный коэффициент.

Значения  $\bar{y}, \sigma_y$ , найденные при обработке предыдущего кадра, используются при анализе результатов фильтрации текущего изображения, что позволяет алгоритму обнаружения контура светового следа подстраиваться под изменения внешней освещенности объекта (рельса). Результат обнаружения контура светового следа представляет собой массив дискретных точек (рис. 1, б).

Полезным сигналом в обнаруженном контуре светового следа является сегмент, соответствующий головке рельса, все остальные сегменты представляют собой помехи. Кроме того, из-за износа боковая грань головки рельса может иметь произвольную форму. Следовательно, единственным участком контура, который имеет относительно стабильную форму и может быть распознан, является часть кривой, соответствующая верхней грани головки рельса.

Верхняя грань головки рельса чаще всего имеет небольшую кривизну, но в общем случае может рассматриваться как прямая. Наиболее распространенный метод распознавания прямых линий на цифровых изображениях базируется на преобразовании Хафа, согласно которому каждую точку на изображении можно представить в виде семейства прямых:

$$F(\rho, \varphi, x, y) = x \cos \varphi + y \cos \varphi - \rho,$$

где  $\rho_{min} \leq \rho \leq \rho_{max}, \varphi_{min} \leq \varphi \leq \varphi_{max}$  — параметры прямых в полярных координатах.

Распознавание прямых линий на бинарных изображениях выполняется следующим образом. Значения  $\rho$  и  $\varphi$  изменяются от  $\rho_{min}$  до  $\rho_{max}$  с шагом  $\Delta\rho$  и от  $\varphi_{min}$  до  $\varphi_{max}$  с шагом  $\Delta\varphi$  соответственно. При этом формируется матрица  $G(\rho, \varphi)$ , элементы которой содержат количество найденных точек, удовлетворяющих неравенству:

$$|x \cos \varphi + y \cos \varphi - \rho| \leq \rho_n,$$

где  $\rho_n$  — заданное пороговое значение.

Значения  $\rho$  и  $\varphi$ , которые соответствуют элементу матрицы  $G$  с максимальным значением,

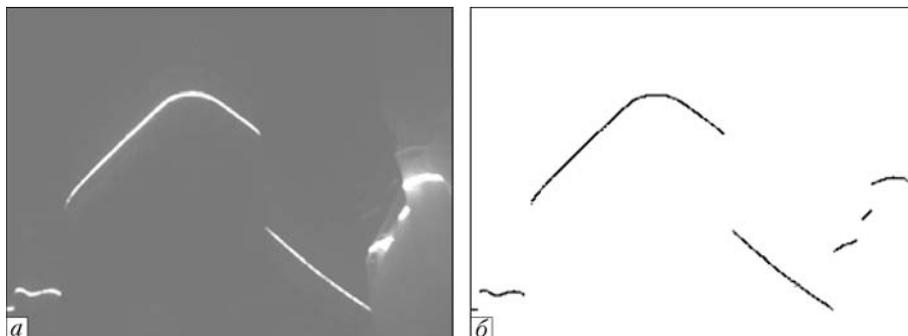


Рис. 1. Исходное изображение светового следа на поверхности рельса (а) и результат обнаружения контура светового следа (б)



принимаются в качестве результатов распознавания прямой линии. Несмотря на простоту метода Хафа его практическая реализация связана с рядом трудностей. Во-первых, перебор по двум параметрам  $\rho$  и  $\varphi$  представляет собой достаточно ресурсоемкий процесс. Во-вторых, необходим значительный объем памяти для хранения элементов матрицы  $G$ . Для повышения производительности процедуры распознавания и экономии памяти предложено оптимизировать метод Хафа следующим образом. Для каждого значения  $\varphi \in [\varphi_{\min}; \varphi_{\max}]$  с шагом  $\Delta\varphi$  выполняется поворот всех точек массива  $c$  вокруг центра изображения. Координаты точек после каждого поворота записываются в массив  $c'$ . Далее определяется номер столбца изображения  $j'$ , в котором находится максимальное количество точек  $m$  массива  $c'$ . При этом формируется массив  $g$ , каждый элемент которого содержит три значения  $\varphi'$ ,  $j'$  и  $m$ . После перебора всех значений угла поворота в массиве  $g$  осуществляется поиск максимального значения  $m_{\max}$  и на основании соответствующих значений  $\varphi'$ ,  $j'$  восстанавливается уравнение прямой в виде  $i = kj + b$ , которое принимается в качестве результата распознавания (рис. 2, а). Для компенсации шума в кривой контура значения  $m$  в массиве  $g$  предварительно сглаживаются путем усреднения  $k$  соседних значений. Данный алгоритм полностью сохраняет функциональность метода Хафа, но при этом отличается более высокой производительностью и существенной экономией памяти. Перебор только по одному параметру позволяет повысить производительность более чем на порядок. В качестве точек, соответствующих верхней грани головки рельса, принимаются точки, расстояние от которых до найденной прямой не превышает заданную базу усреднения  $k$ . Диапазон возможного изменения углов наклона про-

филя рельса на изображении заранее известен. Параметр  $m_{\max}$  может служить в качестве индикатора наличия полезного сигнала на изображении. Если значение  $m_{\max}$  меньше некоторого порогового значения, то обработка текущего изображения прекращается и формируется сообщение об ошибке.

Для поиска остальных точек, которые соответствуют боковой грани головки рельса, достаточно использовать то обстоятельство, что номинальные размеры головки рельса определенного типа являются константами, а размеры головки изношенного рельса могут изменяться только в сторону уменьшения. Для оценки размеров объекта по его изображению необходимо выполнять преобразование от экранных координат  $(i, j)$  к метрическим координатам реального пространства в световой плоскости  $(y, z)$ . Для реализации данного преобразования можно использовать математическую модель, описывающую связь между видеокамерой, лазером и пространством объектов [8]. Параметры модели определяются в процессе калибровки сенсорного блока. После преобразования координат на основании номинальных размеров головки рельса несложно определить область, в которой могут находиться точки, соответствующие боковой грани головки рельса (рис. 2, б). Точки, находящиеся в заданной области, добавляются к массиву, содержащему найденный профиль верхней грани головки рельса.

После обнаружения профиля головки рельса необходимо определить координаты характерных точек, относительно которых определяются размеры или смещение объекта. В соответствии с нормативными требованиями вертикальное смещение рельса определяется относительно центра верхней грани головки рельса, а горизонтальное (поперечное) смещение — относительно точки на боковой грани головки рельса, находящейся на 13 мм ниже верха его головки. Таким образом, первая харак-

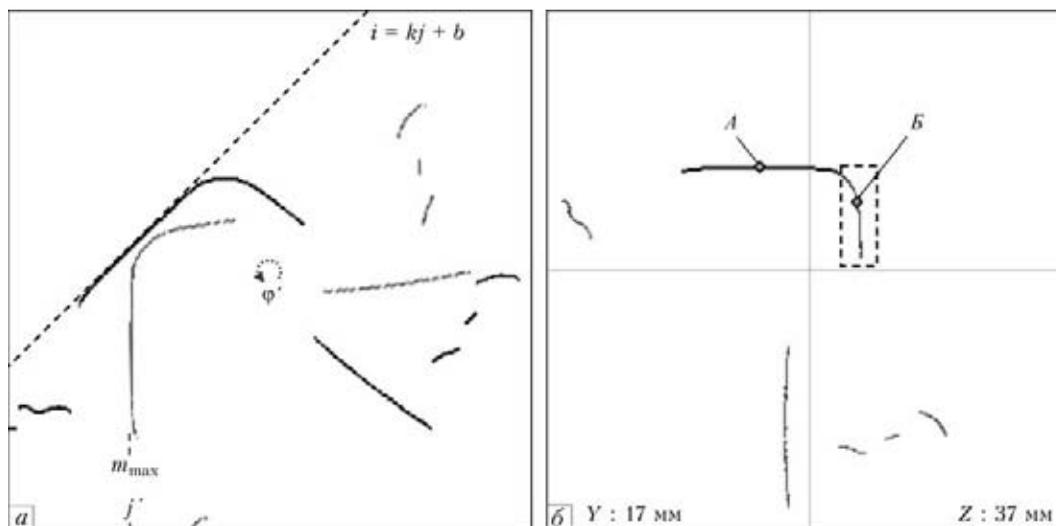


Рис. 2. Поиск профиля головки железнодорожного рельса: а — обнаружение верхней грани головки; б — обнаружение боковой грани головки и характерных точек



терная точка вычисляется как горизонтальная координата центра масс для массива точек, соответствующих верхней грани головки рельса, вторая — как точка пересечения кривой, соответствующей боковой грани головки рельса, с прямой линией, опущенной на 13 мм относительно первой характерной точки (точки *A* и *B* на рис. 2, б). Перед вычислением координат точки *B* профиль боковой грани головки рельса представляется в виде интерполяционного полинома.

### Выводы

Разработанное алгоритмическое обеспечение позволило создать экспериментальную модель лазерно-триангуляционной СТЗ с рабочей частотой 100 Гц на базе недорогого микропроцессора с незначительной на сегодня тактовой частотой в 500 МГц. В ходе экспериментов установлено, что СТЗ способна эффективно функционировать в условиях механических помех, характерных для отечественного железнодорожного пути. Относительные потери данных не превышают 0,5 %. Предложенная методика разработки алгоритмического обеспечения может быть использована при создании ряда высокопроизводительных ла-

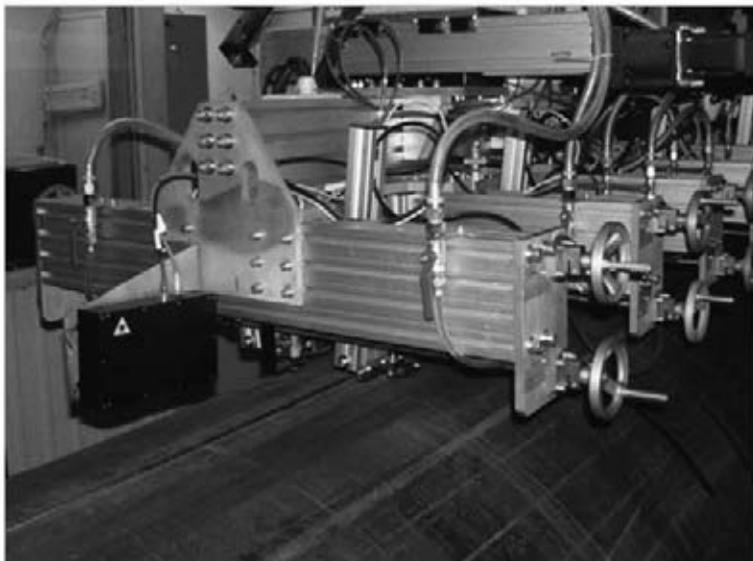
зерно-триангуляционных СТЗ, предназначенных для обнаружения объектов с линейными элементами на фоне помех.

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. // Под ред. Д. С. Лебедева. — М.: Мир, 1982. — Кн. 2. — 480 с.
2. Голд Б., Рэйдер Ч. Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ. // Под ред. А. М. Трахтмана. — М.: Сов. радио, 1973. — 363 с.
3. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений / Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1986. — 400 с.
4. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов / Пер. с англ. И. И. Грушко. — М.: Мир, 1989. — 448 с.
5. Форсайт Д. А., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход // Пер. с англ. А. В. Назаренко, И. Ю. Дорошенко. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. — 928 с.
6. Железнодорожный путь: Учеб. для студ. вузов железнодорожного транспорта / Т. Г. Яковлева, Н. И. Карпущенко, С. И. Клинов и др. // Под ред. Т. Г. Яковлевой. — М.: Транспорт, 1999. — 405 с.
7. Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов / Я. А. Фурман, А. В. Кревецкий, А. К. Передреев и др. // Под ред. Я. А. Фурмана. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 592 с.
8. Киселевский Ф. Н., Коляда В. А. Калибровка триангуляционных оптических сенсоров // Автомат. сварка. — 2005. — № 5. — С. 57–58.

Поступила в редакцию  
26.06.2012

## ■ СИСТЕМА СЛЕЖЕНИЯ ЗА ШВОМ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ СВАРНЫХ ТРУБ

Основная задача системы – автоматическая коррекция положения ультразвуковых датчиков относительно шва в процессе контроля. Точность слежения за швом составляет  $\pm 0,5$  мм при скорости ультразвукового контроля до 30 м/мин. Система слежения используется в комплекте установки АУЗК НК-360 (НК-361) на предприятии ОАО «Выксунский металлургический завод» (Россия, 2005 г.).



РАЗРАБОТАНО В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины