

СОГЛАСОВАНИЕ ФОТО- И ТЕРМОИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗАЦИИ МОБИЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЛОКОМОТИВОВ

Капустин А.Н., Лукьянов А.А.

Иркутский Государственный Университет Путей Сообщения

В современной научно-технической литературе достаточно широко и подробно описаны преимущества метода тепловизионной диагностики, его особенности, основные сферы применения. Данный метод позволяет выявить широкий спектр неисправностей как электрических, так и механических устройств. В частности, данный метод позволяет диагностировать состояние трансформаторов, токоведущих частей ЛЭП, подстанций и т.д., всех электрических соединений в любой сборке, от сборки тиристоров в ВИП электроваз до контроля состояния материнской платы компьютера. Кроме того, могут быть выявлены дефекты состояния электрических машин, например контроль состояния обмоток и пайки шунтов главных и дополнительных полюсов, контроль якорных обмоток, контроль прилегания щеток в коллекторно-щеточном узле и т.д. Тепловизионным методом выявляются и многие механические дефекты тех узлов, состояние которых можно определить, исходя из тепловой картины: муфты, подшипники, редукторы, цилиндры поршневых машин, холодильники (радиаторы охлаждения), скрытые поверхностные трещины различных деталей, расслоение покрытий и т.д. Проведенные исследования [1] в полной мере показали возможность и перспективность контроля данных узлов. Опытным путем, определено, что использовать весь потенциал, заложенный в методе тепловизионного контроля и диагностики возможно только путем качественного изменения подхода к интерпретации данных. На данный момент остро стоит вопрос об извлечении всей информации из термокадра, её автоматической классификации по узлам и деталям. Поскольку изначально термограмма отличается от снимка в оптическом диапазоне, выражена в условных цветах и (или) изменениях яркости, возможность правильного восприятия информации термокадра зависит от способа и качества визуализации термограммы. Данная задача решается различными путями, от искусственной детализации изображения на термограмме путем его обработки с использованием различных методов повышения контраста до жесткой привязки к термограмме полученного одновременно с ней снимка в оптическом диапазоне. Последний способ одновременно является и самым эффективным. Однако, его используют лишь для того, чтобы визуально сделать более понятным слабоконтрастное в инфракрасных лучах изображение. Сбор и классификация информации по-прежнему остаются прерогативой исследователя, а значит, очень сильно зависят от человеческого фактора. В этом случае о серьезных статистических исследованиях получаемых таким методом данных можно говорить, только сознавая их невысокую достоверность.

В перспективе, при использовании тепловизионного контроля, очень важна диагностика электрических соединений, токоведущих частей и контактов. Однако, получаемые термограммы сложны для визуальной интерпретации, поскольку в них присутствует множество схожих по внешнему виду объектов, зачастую различно окрашенных (ввиду различия температур). Такой снимок, даже в сочетании с фотографией в оптическом диапазоне, способен лишь дать общую информацию о состоянии узлов, для диагностики состояния отдельных элементов потребуются дополнительные измерения. Кроме того, не приходится говорить о мониторинге исследуемых узлов, поскольку регулярного и последовательного отслеживания состояния всех деталей не происходит, исследователь при обработке термограмм не в состоянии с высокой производительностью контролировать соответствие температуры для всех интересующих его участков схемы значениям уставок, или индивидуальным, критическим для данного элемента значениям температур.

Таким образом, необходимо решить задачу контроля состояния большого количества, в том числе и однотипных, элементов, при этом вся информация о важных для исследователя узлах должна заноситься в базу данных. Предложенная методика состоит в следующем. Первый этап решения данной задачи – определение соответствия видеоизображения термограмме, трансформация видеоизображения до полного совпадения контрольных точек на видео и термоизображении [2]. Второй этап – определение участков контроля и соответствия контрольного изображения базовому. Третий этап – определение соответствия эталонного снимка термограмме, после чего состояние интересующих исследователя узлов фиксируется. Рассмотрим первый этап методики подробнее.

Необходимо отметить, что у используемых сенсоров принципиально различные системы формирования изображений. Тепловизор формирует картинку с помощью поэлементной механической развертки, выполненной на основе системы зеркал, направляющих излучение на фокусирующую систему [3]. Далее, узкий пучок попадает на одноэлементный датчик, с изменяющимися электрическими свойствами в зависимости от интенсивности попадающего на него излучения. Электрический сигнал интерпретируется в значение температуры согласно внутренним калибровочным данным тепловизора. Оптический же сенсор представляет собой обычную систему на основе линз и регистрирующей матрицы, а значит регистрируемое изображение обладает присущим системе недостатком – дисторсией изображения.

Пусть существует реальное изображение А. Тогда сенсор, регистрирующий изображение в оптическом диапазоне, формирует картинку, не совпадающую с изображением, получаемым с помощью камеры-

обскуры. Идеальное изображение искажено дисторсией, в результате формируется реальное изображение, которое можно описать как $\mathbf{D}(A)$, здесь \mathbf{D} – функция дисторсии объектива. Термограф, в силу отличного устройства регистрирующей системы, не создаёт подобных искажений, однако в его конструкции могут наблюдаться искажения растяжения или сжатия как по вертикальной, так и по горизонтальной оси. Искажения, вносимые данной системой можно обозначить как $\mathbf{G}(A)$. Кроме того, поскольку оба сенсора имеют различные поля зрения, фиксируют одну сцену одновременно из разных точек, между формируемыми изображениями существуют проективные искажения, которые зависят от параллакса, изменяющегося с изменением расстояния от сенсоров до сцены. Наличие проективных искажений можно представить как $\mathbf{P}(\mathbf{D}(A), l)$, здесь l – расстояние от сенсоров до объектива. Таким образом, необходимо сопоставить каждой точке изображения, формируемого одним сенсором, точку изображения, полученного другим сенсором либо обозначить ограничения по минимально возможному расстоянию до сцены для регистрирующих устройств.

Корректировка дисторсии оптической подсистемы

Формирование камерой изображения реальной сцены можно представить следующим образом:

Считаем, что в трехмерном пространстве (X, Y, Z) есть плоскость π , точки на которой имеют координаты $P_i : (X_i, Y_i) \in \pi$, проецируются на плоскость матрицы камеры идеально (модель камеры-обскуры) с идеальными координатами на плоскости матрицы $\bar{p}_i : (\bar{x}_i, \bar{y}_i)$; координатные оси для плоскости сцены в пространстве и плоскости матрицы камеры считаем параллельными. Однако, поскольку существует дисторсия, точки $\bar{p}_i : (\bar{x}_i, \bar{y}_i)$ преобразуются в точки $p_i : (x_i, y_i)$ с несовпадающими координатами. Далее, считаем, что искаженные координаты в плоскости матрицы преобразуются в пиксельные координаты (u, v) по закону [4]:

$$x = d_x (u - u_0), y = d_y (v - v_0) (1),$$

здесь (u_0, v_0) – координаты центра матрицы, в пикселях, d_x и d_y – расстояние между соседними пикселями соответственно в горизонтальном и вертикальном направлении в плоскости матрицы.

Идеальные координаты могут быть выражены из реальных с использованием коррекции на дисторсию

$$\bar{x} = x + \delta_x, \bar{y} = y + \delta_y (2),$$

где

$$\delta_x = k_1 x(x^2 + y^2) + p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2 xy + s_1(x^2 + y^2), (3)$$

$$\delta_y = k_1 y(x^2 + y^2) + p_2(3x^2 + y^2) + 2p_1 xy + s_2(x^2 + y^2), (4)$$

здесь $k_1 y(x^2 + y^2)$ – радиальная, $p_2(3x^2 + y^2) + 2p_1 xy$ – децентрированная и $s_2(x^2 + y^2)$ – дисторсия тонкой призмы; k_1, p_1, p_2, s_1 и s_2 – коэффициенты дисторсии.

Исследованиями определено, что в искажениях преобладает радиальная дисторсия, более того, значимым является первый коэффициент k_1 . Тогда выражения (2) преобразуются следующим образом:

$$\bar{x} = d_x \left((u - \tilde{u}_0) + (u - \tilde{u}_0)^3 k'_1 k^2 + (u - \tilde{u}_0)(v - v_0)^2 k'_1 \right) (5),$$

$$\bar{y} = d_y \left((v - \tilde{v}_0) + (u - \tilde{u}_0)^2 (v - v_0) k'_1 k^2 + (v - \tilde{v}_0)^3 k'_1 \right) (6)$$

здесь $(\tilde{u}_0, \tilde{v}_0)$ – координаты центра дисторсии, $k'_1 = k'_1 d_y^2$ – коэффициент дисторсии, $k = d_x / d_y$ – коэффициент масштабирования изображения.

Таким образом, зная координаты центра дисторсии, коэффициент дисторсии и коэффициент масштабирования изображения, можно компенсировать явление радиальной дисторсии: из выражений (5) и (6) получаем идеальные координаты

$$\bar{u} = u + (u - \tilde{u}_0)^3 k'_1 k^2 + (u - \tilde{u}_0)(v - v_0)^2 k'_1 (7),$$

$$\bar{v} = v + (u - \tilde{u}_0)^2 (v - v_0) k'_1 k^2 + (v - \tilde{v}_0)^3 k'_1. (8).$$

Таким образом, определение идеальных координат изображения сводится к определению координат центра дисторсии, коэффициента дисторсии и коэффициента масштабирования изображения.

Один из эффективных способов для определения данных величин выглядит следующим образом.

Для проективных преобразований существует понятие проективного инварианта, величины, определяемой для набора точек на плоскости, которая не меняется при любых проективных искажениях данного набора. В частности, для любых четырех точек, лежащих на одной прямой в идеальной, внешней системе координат, с известными расстояниями относительно друг друга, в системе координат камеры является инвариантом выражение

$$inv = \frac{f_{13}f_{24}}{f_{34}f_{12}} \quad (9),$$

где

$$f_{ij} = (u_j - \tilde{u}_0)(v_i - \tilde{v}_0) - (u_i - \tilde{u}_0)(v_j - \tilde{v}_0), \text{ если } (\tilde{u}_0, \tilde{v}_0) - \text{ координаты центра радиальной дисторсии.}$$

Т.е. выражение (9) принимает одинаковые значения для любой проективной трансформации выбранных 4-х точек на одной прямой, для любого фокусного расстояния (разумеется, при неизменном реальном расположении точек друг относительно друга).

Таким образом, если существует несколько изображений, снятых с различных ракурсов, где можно зафиксировать одни и те же 4 точки на одной прямой, то наличие, например, 3-х изображений позволит определить значения неизвестных величин - $(\tilde{u}_0, \tilde{v}_0)$. Методом наименьших квадратов можно получить решение для большего числа изображений.

Для определения коэффициента дисторсии и коэффициента масштабирования изображения также можно воспользоваться выражением для точек, располагающихся на одной прямой. Условие корректного расположения трех точек $\bar{p}_i : (\bar{x}_i, \bar{y}_i)$ на одной прямой выглядит следующим образом:

$$(\bar{x}_3 - \bar{x}_1)(\bar{y}_2 - \bar{y}_1) - (\bar{x}_2 - \bar{x}_1)(\bar{y}_3 - \bar{y}_1) = 0 \quad (10).$$

Подставляя выражения из (5) и (6) в (10), получим нелинейное уравнение на неизвестные коэффициенты k'_1 и k . Решая его, определим значения коэффициентов. После этого реальные пиксельные координаты пересчитываются в идеальные по формулам (7) и (8).

Определение влияния параллакса при изменении расстояния от сенсоров до сцены.

Используемые сенсоры, в силу конструктивных ограничений, имеют различные углы зрения, различные поля зрения, отношение которых может меняться при изменении расстояния от объекта съемки до плоскости матриц сенсоров (считаем разницу в расстоянии между матрицей оптического сенсора и датчиком теплового до объекта съемки пренебрежимо малой). Поэтому, учитывая влияние параллакса, примем следующие допущения:

- 1) линия визирования может отклоняться от плоскости съемки лишь незначительно;
- 2) искажения, формируемые оптическим сенсором, устранены;
- 3) геометрическими искажениями в термограмме пренебрегаем в силу малой величины.

Итак, преобразование точек одного изображения в точки другого можно проводить, руководствуясь моделью сенсоров, как камер-обскур с параллаксом и различными углами зрения. Тогда преобразование одного изображения в другое будет проективным [5], по формуле

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \omega' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$x = \frac{x'}{\omega'} = \frac{a_{11}x + a_{12}y + a_{13}\omega}{a_{31}x + a_{32}y + a_{33}\omega} \quad (12)$$

$$y = \frac{y'}{\omega'} = \frac{a_{21}x + a_{22}y + a_{23}\omega}{a_{31}x + a_{32}y + a_{33}\omega} \quad (13)$$

Число степеней свободы при проекционных преобразованиях принимают равным 8, часто переменную ω и коэффициент a_{33} для удобства принимают равным 1.

Для расчета матрицы коэффициентов преобразования достаточно 4-х опорных точек. Для каждой точки известны 2 координаты – x и y , следовательно, существует 2 уравнения. Четыре опорных точки дают 8 уравнений, достаточно для нахождения 8-и коэффициентов матрицы.

Определим соответствие центральной точки (или точки, близкой к центру кадра) термограммы аналогичной точке на снимке в оптическом диапазоне. Расчет поправки на параллакс состоит из следующих шагов:

Определим коэффициенты масштабирования для термограммы и фотоснимка:

$$D_x = \frac{X_O}{X_T}, \quad D_y = \frac{Y_O}{Y_T}, \quad X_O, X_T, Y_O, Y_T - \text{соответственно размеры изображений по осям X и Y. Далее, вы-}$$

бирая ближайшую к центру термограммы контрольную точку, получаем ее координаты x_i^T, y_i^T , определяем

соответствующие координаты на фотографии x_i^O, y_i^O , после чего определяем разницу в отображении точки по формуле $\Delta_i^x = x_i^O - D_x x_i^T, \Delta_i^y = y_i^O - D_y y_i^T$.

Таким образом, исчисленные значения Δ_i^x, Δ_i^y для тестовых изображений зависят от расстояния до сцены l , и аппроксимируются некоторой кривой поправок $F(l)$. Как показали экспериментальные исследования, целесообразно вводить кривую поправок только для оси координат, параллельной прямой, соединяющей оптические центры обоих сенсоров. В завершение исчисляется коррекция координат, полученных с помощью проективных преобразований идеальных координат фотографии, на величину поправки. Расстояние, а следовательно и величина поправки определяются, исходя из EXIF-параметров фотографии.

Литература

1. Лукьянов А.А., Капустин А.Н., Бондарик В.В. Термодиагностика оборудования электровозов// Локомотив. - 2004, №6. – С. 24-25.
2. Капустин А.Н. Алгоритм сопоставления видео- и термоизображений для задач калибровки термооптической системы неразрушающего контроля оборудования электровозов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- ИрГУПС, 2004, №2 – С.109-119.
3. Госсорг Ж. Инфракрасная термография: пер. с франц. М.: Мир, 1988. – 399 с.
4. G.-Q. Wei, S. D. Ma Implicit and Explicit Camera Calibration: Theory and Experiments, Proc/ IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. 16, no. 5, pp. 469-480 May 1994
5. A. Goshtasby, Transformation functions, Computer Aided Design, vol. 27, no 5, pp. 363-375, 1995

