



СОВМЕЩЕНИЕ ДИСКРЕТНЫХ КРИВЫХ В ЗАДАЧЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

В. А. КОЛЯДА, Е. В. ШАПОВАЛОВ

Предложена двухшаговая процедура совмещения дискретных кривых, предназначенная для решения проблемы сравнения измеренного профиля рельса с эталоном при бесконтактном автоматизированном контроле геометрических параметров железнодорожных рельсов. Разработанная процедура позволяет выполнять обработку результатов сканирования профилей рельсов в масштабе реального времени.

A two-step procedure is proposed for superposition of discrete curves designed for solving the problem of comparison of the measured rail profile with the standard at contactless automated control of geometrical parameters of railway rails. Developed procedure allows processing the results of scanning the rail profile in real-time.

Одним из основных направлений развития средств диагностики железнодорожных путей является повышение достоверности контроля за счет внедрения новых технических средств автоматизированного контроля и документирования результатов компьютеризированными комплексами. Среди новых технических средств, которые в последнее время активно внедряются в зарубежные диагностические комплексы, широкое распространение получили системы контроля геометрических параметров рельсов, основанные на средствах технического зрения. Основным преимуществом таких систем является бесконтактность, значительное количество контролируемых параметров, возможность контроля при высоких скоростях движения путеизмерительных поездов.

Общий принцип работы систем бесконтактного контроля геометрических параметров рельсов основан на методе лазерной триангуляции. С помощью лазерных лучей, развернутых в плоскость, на поверхности рельса формируется световой след. Две видеокамеры, расположенные под некоторыми триангуляционными углами к плоскости лазерного излучения, регистрируют участки светового следа, находящиеся по разные стороны рельса. На этапе обработки видеозображений формируются массивы дискретных точек, которые соответствуют криволинейным сегментам поперечного профиля рельса. Для решения задачи контроля геометрических параметров рельса необходимо сравнивать измеренный профиль рельса с некоторой моделью, в качестве которой используется фиксированный массив дискретных точек, сформированный на основании чертежа эталонного рельсового профиля. В общем случае измеренный профиль рельса может быть ориентирован относительно эталонного профиля случайным об-

разом, как, например, показано на рис. 1. Случайная ориентация измеренного профиля объясняется тем, что сенсорные блоки, которые выполняют лазерно-телевизионное сканирование рельсов, подвержены различным колебаниям и вибрациям в процессе движения путеизмерительного поезда. Кроме того, количество точек в измеренном профиле также непостоянно, что обусловлено изменениями ориентации светового следа на видеоизображениях и влиянием различных механических и оптических помех. Таким образом, для сравнения измеренного профиля с эталоном необходимо наилучшим образом совместить две дискретные кривые, одна из которых имеет случайную ориентацию и произвольное количество элементов.

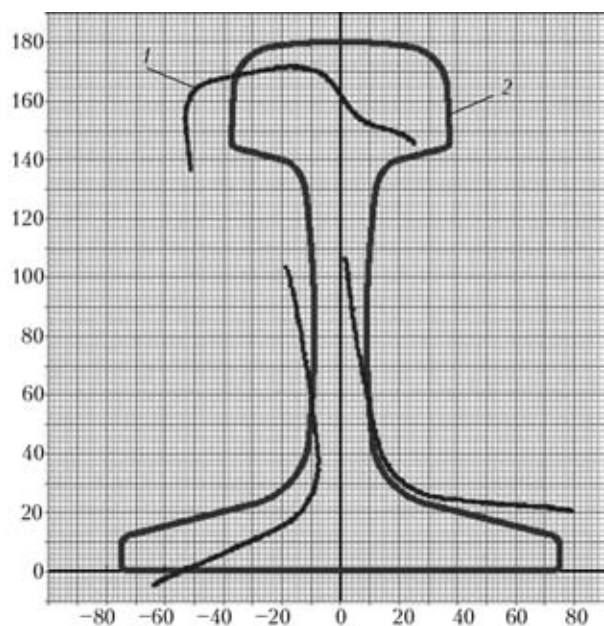


Рис. 1. Пример взаимного положения измеренного (1) и эталонного (2) профилей рельса



Постановку задачи совмещения дискретных кривых, соответствующих измеренному и эталонному профилям рельса, можно представить следующим образом. Пусть $\{\mathbf{d}_i\}_{i=1}^{N_d}$ и $\{\mathbf{m}_j\}_{j=1}^{N_m}$ — соответственно массивы дискретных точек данных (измеренного профиля) и модели (эталонного профиля). Необходимо найти такое преобразование T , при котором достигается наилучшее совпадение данных с моделью. Параметры преобразования T задаются в виде вектора \mathbf{a} . Вид вектора параметров \mathbf{a} зависит от типа преобразования, которому подвергаются данные по отношению к модели в конкретной задаче. Мера приближения данных к модели определяется функцией ошибки $\varepsilon^2(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x}\|^2$. Пары сопряженных точек из массивов данных и модели задаются функцией соответствия $\varphi(i)$. Также вводится функция весов w_i , которая равна единице, если $\varphi(i) = j$, и равна нулю во всех остальных случаях. Отсюда задачу минимизации ошибки совмещения данных с моделью можно записать в виде:

$$E(\mathbf{a}, \varphi) = \sum_{i=1}^{N_d} w_i \min_{\varphi(i)} \varepsilon^2(|\mathbf{m}_{\varphi(i)} - T(\mathbf{a}; \mathbf{d}_i)|). \quad (1)$$

Конечная оценка оптимального преобразования, которое обеспечивает наилучшее совпадение данных с моделью, определяется по формуле:

$$\hat{\mathbf{a}} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{a}} \sum_{i=1}^{N_d} w_i \min_{\varphi(i)} \varepsilon^2(|\mathbf{m}_{\varphi(i)} - T(\mathbf{a}; \mathbf{d}_i)|). \quad (2)$$

Выражения (1), (2) представляют собой общую постановку задачи совмещения дискретных кривых.

В ходе анализа и практического тестирования методов совмещения дискретных кривых установлено, что для совмещения профилей рельсов наиболее целесообразно использовать метод ИСР (Iterated Closest Point), который базируется на итеративном приближении точек совмещаемых кривых [1]. В отличие от методов совмещения, представленных в публикациях [2, 3], которые основаны на отличительных признаках или инвариантах, данный метод практически не чувствителен к форме совмещаемых кривых и изменению количества дискретных точек в массиве данных. При реализации метода ИСР в качестве сопряженных точек из массивов данных и модели выбираются пары, соответствующие так называемому расстоянию Хаусдорфа [4]. Расстоянием Хаусдорфа называется минимальное расстояние между точкой одного массива и всеми точками другого массива. Каждая итерация алгоритма, реализую-

щего метод ИСР, состоит из двух этапов. На первом этапе вычисляется функция соответствия φ :

$$\varphi(i) = \operatorname{argmin}_{j \in \{1, \dots, N_m\}} \varepsilon^2(|\mathbf{m}_j - T(\mathbf{a}_k; \mathbf{d}_i)|), \quad i = 1, \dots, N_d. \quad (3)$$

На втором этапе выполняется перерасчет вектора параметров преобразования \mathbf{a} :

$$\mathbf{a}_{k+1} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{a}} \sum_{i=1}^{N_d} \varepsilon^2(|\mathbf{m}_{\varphi(i)} - T(\mathbf{a}; \mathbf{d}_i)|). \quad (4)$$

На практике для реализации второго этапа используются методы многомерной нелинейной оптимизации функции. Операции, выполняемые на первом и втором этапе, итеративно уменьшают ошибку. При этом алгоритм имеет гарантированную сходимость к некоторому локальному минимуму ошибки. Вместе с тем итеративное совмещение дискретных кривых представляет собой довольно ресурсоемкую процедуру, которую необходимо оптимизировать под конкретную задачу.

Для решения задачи совмещения дискретных кривых, соответствующих измеренному и эталонному профилям рельса, изначально необходимо определить вектор параметров преобразования \mathbf{a} . Измеренный профиль рельса всегда находится в плоскости XOY опорной системы координат (плоскости лазерного излучения), т. е. удаленность профиля относительно наблюдателя (видеокамеры) является постоянной величиной ($t_z = \text{const}$). С другой стороны объект (рельс) может произвольным образом изменять свою ориентацию относительно плоскости XOY . В общем случае рельс может быть повернут вокруг осей OX , OY и OZ опорной системы координат на углы α , β и γ соответственно. Также профиль рельса может иметь линейные смещения t_x и t_y в плоскости XOY . Таким образом, в общем случае вектор параметров преобразования имеет следующий вид: $\mathbf{a} = [\alpha \ \beta \ \gamma \ t_x \ t_y]$. При этом связь между каждой точкой данных и соответствующей точкой модели определяется следующим преобразованием:

$$\begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma) \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где d_x, d_y — координаты точки массива данных \mathbf{d} ; m_x, m_y — координаты соответствующей точки массива модели \mathbf{m} ; $\mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma)$ — общая матрица поворота вокруг трех осей опорной системы координат.

В формуле (5) представлено преобразование от модели к данным, где в качестве аргумента выступают координаты точек модели. Но в данном случае необходимо использовать обратное преобразование от данных (измеренного профиля) к мо-

дели (эталонному профилю), которое будет иметь следующий вид:

$$\begin{bmatrix} m_x \\ m_y \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{-1}(\alpha, \beta, \gamma) \left(\begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

Тогда преобразование T запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} T_5(\mathbf{a}; \mathbf{d}_i) &= T(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y; \mathbf{d}_i) = \\ &= \mathbf{R}^{-1}(\alpha, \beta, \gamma) \left(\mathbf{d}_i - \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

На практике измеренный профиль формируется в виде отдельных массивов данных для левой и правой стороны рельса. В свою очередь каждый массив состоит из двух сегментов, соответствующих «головке» и «основанию» рельса. При этом сформированные массивы точек данных и модели имеют аналогичный порядок обхода профиля рельса. Эти практические предпосылки используются для повышения быстродействия процедуры, реализующей первый этап каждой итерации совмещения дискретных кривых согласно формуле (3). Для уменьшения вычислительных затрат, требуемых для расчета значений функции соответствия ϕ , используются следующие два приема:

— для каждой точки из массива данных, принадлежащей конкретному сегменту «головки» или «ноги» рельса, поиск сопряженной точки выполняется только в пределах соответствующего сегмента модели;

— если для точки данных \mathbf{d}_i найдена сопряженная ей точка модели \mathbf{m}_j , то для точки \mathbf{d}_{i+1} поиск сопряженной точки в массиве модели начинается с элемента \mathbf{m}_{j+1} .

Такие несложные приемы позволяют существенно уменьшить количество вычислительных операций, необходимых для реализации первого этапа итеративной процедуры совмещения дискретных кривых, соответствующих измеренному и эталонному профилям рельса. При этом один из сегментов измеренного профиля, который в наибольшей степени подвержен износу, не участвует в расчете функции соответствия ϕ .

Для реализации второго этапа итеративной процедуры совмещения в качестве метода многомерной нелинейной оптимизации функции выбран метод главных осей (Principal Axis Method), представленный в работе [5]. Основным преимуществом данного метода по сравнению с другими распространенными методами нелинейной оптимизации, такими как квази-ньютонские методы и метод Левенберга–Маркварда, является то обстоятельство, что в процессе поиска экстремума выполняется расчет только значения функции в точке и не требуется вычисление дополнительных параметров, таких как градиент или якобиан функ-

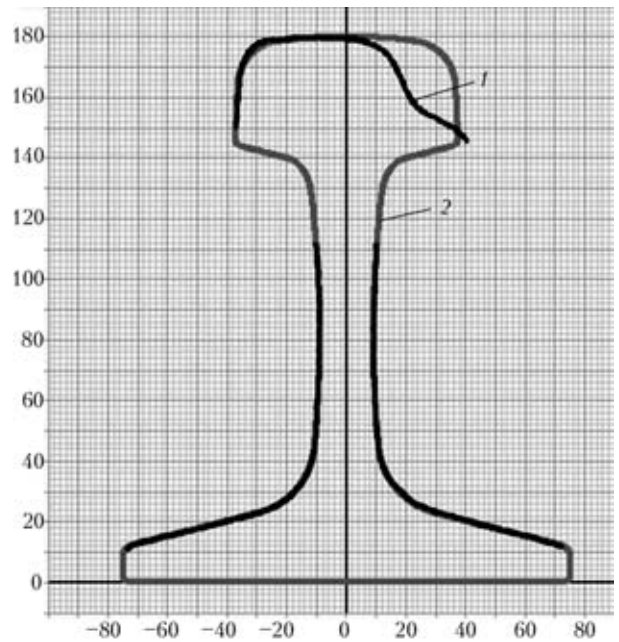


Рис. 2. Результаты совмещения измеренного (1) профиля рельса с эталоном (2) при использовании преобразования T_5

кции. Также экспериментально установлено, что применительно к задаче совмещения дискретных кривых минимизация функции по методу главных осей выполняется в 2...3 раза быстрее, чем при использовании других методов.

После выполнения K -итераций алгоритма ИСР, представленного формулами (3), (4), полученные параметры \mathbf{a}_K используются для пересчета координат точек массива данных \mathbf{d} в соответствии с заданным преобразованием T .

На рис. 2 представлен результат совмещения измеренного профиля рельса с эталоном при использовании преобразования T_5 , представленного выражением (7). Количество итераций фиксированное ($K = 20$). Ошибка совмещения профилей $\varepsilon \approx 0,15$ мм. Хотя в данном случае ошибка совмещения и составляет всего 0,08...0,1 % габаритных размеров профиля рельса, при этом процедура совмещения выполняется не совсем корректно. Измеренный профиль рельса просто масштабируется вдоль вертикальной оси до размеров эталона путем его поворота на угол α вокруг оси OX . Однако на практике вертикальный размер (высота) измеренного профиля рельса зависит не только от углового параметра α , но и от вертикального износа головки рельса h_B , что не учитывается при совмещении. Для решения данной проблемы разработана двухшаговая процедура совмещения.

На первом шаге процедуры совмещения полагаем, что секущая световая плоскость ориентирована перпендикулярно к продольной оси рельса, т. е. $\alpha = 0$ и $\mathbf{a}_1 = [\beta \ \gamma \ t_x \ t_y]$. Следовательно, первые K_1 итераций совмещения выполняются с использованием преобразования T в виде:

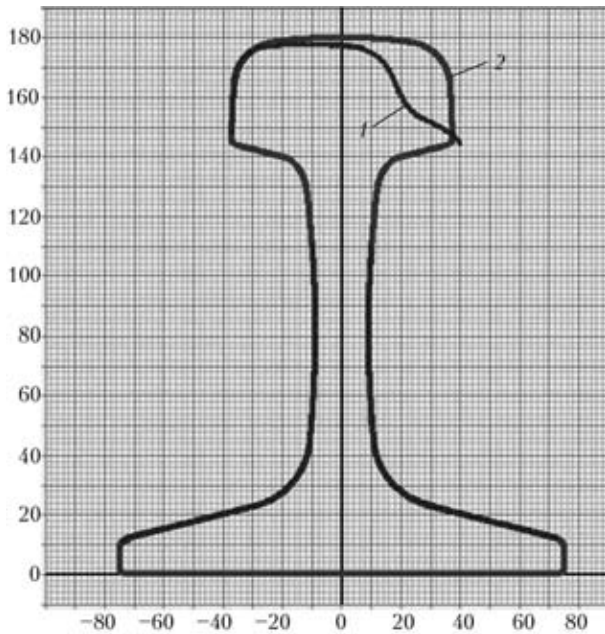


Рис. 3. Результат двухшаговой процедуры совмещения измеренного (1) профиля рельса с эталоном (2) при использовании преобразования T_4, T_2

$$T_4(\mathbf{a}_1; \mathbf{d}_i) = T(\beta, \gamma, t_x, t_y; \mathbf{d}_i) = \mathbf{R}^{-1}(\beta, \gamma) \left(\mathbf{d}_i - \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \right) \quad (8)$$

Первый шаг процедуры совмещения позволяет выполнить максимальное приближение измеренного профиля рельса к эталону без учета параметров α и h_B , которые влияют на высоту профиля.

Второй шаг процедуры совмещения используется для поиска такого значения параметра α , которое бы практически не зависело от вертикального износа h_B . С этой целью на каждой итерации алгоритма ИСР при вычислении функции соответствия ϕ не используются пары сопряженных точек, соответствующие участку рельса, который может быть подвержен значительному вертикальному износу. Например, для рассматриваемого профиля рельса из функции ϕ исключаются точки, которые соответствуют головке рельса и имеют координаты $x > -25$ мм. Для преобразования T достаточно использовать вектор параметров, содержащий всего два элемента: $\mathbf{a}_2 = [\alpha, t_y]$, где значение t_y определяет вертикальное смещение точки поворота профиля вокруг оси OX . Отсюда для выполнения второго шага процедуры совмещения, состоящего из K_2 итераций алгоритма ИСР, используется следующее преобразование:

$$T_2(\mathbf{a}_2; \mathbf{d}_i) = T(\alpha, t_y; \mathbf{d}_i) = \mathbf{R}^{-1}(\alpha) \left(\mathbf{d}_i - \begin{bmatrix} 0 \\ t_y \end{bmatrix} \right) \quad (9)$$

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

На рис. 3 приведен результат выполнения двухшаговой процедуры измеренного профиля рельса с эталоном при использовании преобразований T_4, T_2 в соответствии с формулами (8), (9). Количество итераций на первом и втором шаге фиксированное ($K_1 = 15, K_2 = 5$). Ошибка совмещения ϵ такая же, как и при использовании преобразования T_5 (рис. 2), но в данном случае результат совмещения измеренного профиля рельса с эталоном практически не зависит от h_B , что в дальнейшем позволяет более точно определять значения параметров, характеризующих износ головки рельса.

В ходе экспериментального исследования разработанной двухшаговой процедуры совмещения получено, что при случайном изменении ориентации измеренного профиля рельса относительно эталона в достаточно больших пределах (до $\pm 10^\circ$ и ± 20 мм по угловым и линейным параметрам соответственно) значение ошибки совмещения колеблется незначительно (до $\pm 0,1$ мм). Также экспериментально установлено, что использование большего количества итераций ($K_1 + K_2 > 20$) не приводит к уменьшению ошибки ϵ . Среднее время выполнения одной итерации процедуры совмещения на компьютере средней мощности не превышает 0,5 мс, что позволяет выполнять до 100 совмещений в секунду при $K_1 + K_2 = 20$.

Таким образом, разработанная процедура совмещения измеренного профиля рельса с эталоном позволяет выполнять обработку результатов сканирования профилей рельсов в масштабе реального времени, что дает возможность осуществлять оперативный контроль геометрических параметров рельсов непосредственно в процессе сканирования, а также обеспечивать достаточно высокую точность совмещения профилей, что позволяет повысить достоверность результатов контроля.

1. Andrew W. Fitzgibbon. Robust registration of 2D and 3D point sets // Image & Vision Computing. — 2003. — 21, № 13. — P. 1145–1153.
2. Li S. Z. Matching: invariant to translations, rotations and scale changes // Pattern Recognition. — 1992. — 25. — P. 583–594.
3. Voss K., Sube H., Brauer-Burchardt C. Affine Point Pattern Matching // Pattern Recognition, Lecture Notes in Computer Science 2191, Springer 2001. — P. 155–162.
4. Huttenlocher D. P., Klanderman G. A., Rucklidge W. J. Comparing images using the Hausdorff distance // Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1993. — 15, № 9. — P. 850–863.
5. Brent R. P. Algorithms for Minimization without Derivatives / New Jersey, Prentice-Hall, Englewood Cliffs; Dover Publications, 2002. — 208 p.

Поступила в редакцию 02.01.2009