

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 004.932:519.64

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЧЕСКОГО
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРИНЫ И СЕРПОВИДНОСТИ ЛИСТА МЕТАЛЛА****А. И. Новиков**, д.т.н., доцент, профессор кафедры ЭВМ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0002-8166-8234, e-mail: novikovanatoly@yandex.ru

Д. С. Доков, генеральный директор ООО «НПП «Когерент», Рязань, Россия;

orcid.org/0009-0006-6729-0788, e-mail: dokov@mail.ru

А. И. Ефимов, к.т.н., доцент, доцент кафедры ЭВМ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0002-4014-8718, e-mail: lexie62rus@mail.ru

М. Б. Никифоров, к.т.н., доцент, доцент кафедры ЭВМ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0002-4796-0776, e-mail: nikiforov.m.b@mail.ru

*Рассматривается задача построения математической модели листа металла в процессе его движения по рольгангу. Лист металла после его проката на стане может изменять геометрию краев, в результате чего может возникать явление серповидности. Традиционно серповидность и ширина листа измеряются вручную. Для автоматизации процесса измерения ширины и серповидности предлагается система, в основе которой набор оптических сенсоров (профилометров). Обработка данных от сенсоров должна выполняться за время, не превышающее время, необходимое на проход всего листа. Трудности оценивания по этим данным названных параметров связаны с поворотами и поперечными смещениями в процессе перемещения листа по рольгангу. **Целью работы** является создание адекватной модели металлического листа для апробации алгоритмов определения его характеристик: ширины, серповидности, наличия прочих дефектов. Рассмотрены вопросы построения общего профиля по данным отдельных измерений от системы, содержащей в своем составе шесть профилометров, а также представлено описание алгоритмов нахождения угла поворота, устранения поперечных смещений, оценивания серповидности и ширины листа металла.*

Ключевые слова: профилометр, 2-D модель листа, модель вращений листа, обнаружение некорректных точек, серповидность, оценивание серповидности, аппроксимация краев листа металла.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-88-74-84**Введение**

В работах [1, 2] отмечается, что «При прокатке полос ... непрерывного широкополосного стана горячей прокатки часто возникает дефект формы полосы, который называется «серповидность» – плавное искривление полосы в форме дуги в горизонтальной плоскости» и далее: «...Дальнейшая прокатка полос с такими дефектами чревата серьезными последствиями – полоса серповидной формы при выходе из черновой клетки смещается от центра рольганга, ударяясь о направляющие линейки и ограждение рольганга, а при достижении серповидностью критического значения возникают аварийные ситуации, связанные с выбросом полосы с рольганга» [3].

В названных работах и аналогичных им исследуются причины образования серповидности и способы предотвращения наступления такой ситуации. Вместе с тем наличие серповидности в формируемых полосах металла пока остается частью производственного процесса, полностью устранить которую не представляется возможным. В связи с этим возникает задача измерения ширины листа металла и величины серповидности. Традиционно эта задача решается вручную с использованием простейших инструментов: струны, линейки, шу-

па [4]. В ГОСТ на металлопродукцию отмечается, что «Кривизна (серповидность) определяется наибольшим расстоянием между поверхностью металлопродукции и приложенной линейкой или натянутой струной» и там же «Кривизну и серповидность измеряют линейкой или щупом и выражают в миллиметрах на нормируемую длину» [4].

При производстве металлопроката, а именно – листов и полосы металла, остро стоит задача сплошного автоматического контроля в потоке «серповидности» края листа. При длине листов вплоть до 12 – 18 метров на производственной линии нет места для размещения измерителя такой же длины. Поэтому стоит задача измерять серповидность на всей длине листов с помощью измерительного оборудования, имеющего длину не более 3-х метров. Также нет возможности останавливать прохождение листа по транспортной системе цеха для его измерения, скорость листа порой превышает 3 м/с. Для снятия координат края листа «на ходу» в таком случае применимы бесконтактные высокоскоростные лазерные 2D сканеры (профилометры). Архитектура измерительной системы на базе таких сканеров позволяет вписаться в длину – менее длины листа при условии решения задачи математического объединения разных облаков точек, полученных с профилометров в разные моменты времени при продвижении листа в единый график края листа.

Сочетание системы оптических сенсоров и математических методов для обработки информации, поступающей от сенсоров, дает надежду на решение поставленной задачи в автоматическом режиме.

Теоретическая часть

Разрабатываемая математическая модель соответствует контрольно-измерительной системе из шести профилометров [5, 6], устанавливаемых жестко над проходящим под ней металлическим листом. Данная конструкция обусловлена особенностями транспортной системы листов. Общий внешний вид подобной системы в процессе измерения показан на рисунке 1, а на рисунке 2 представлен эскиз системы с описанием основных элементов.

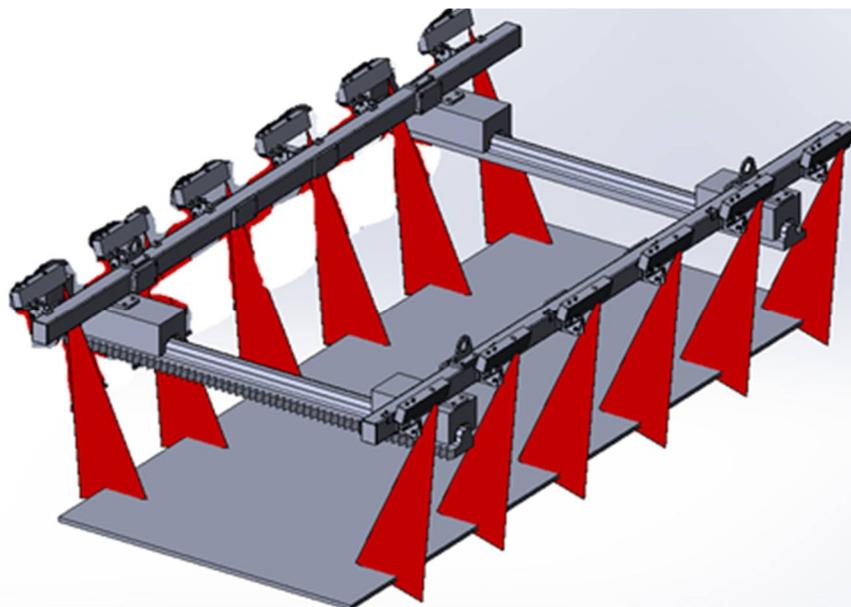


Рисунок 1 – Общий внешний вид системы
Figure 1 – System general appearance

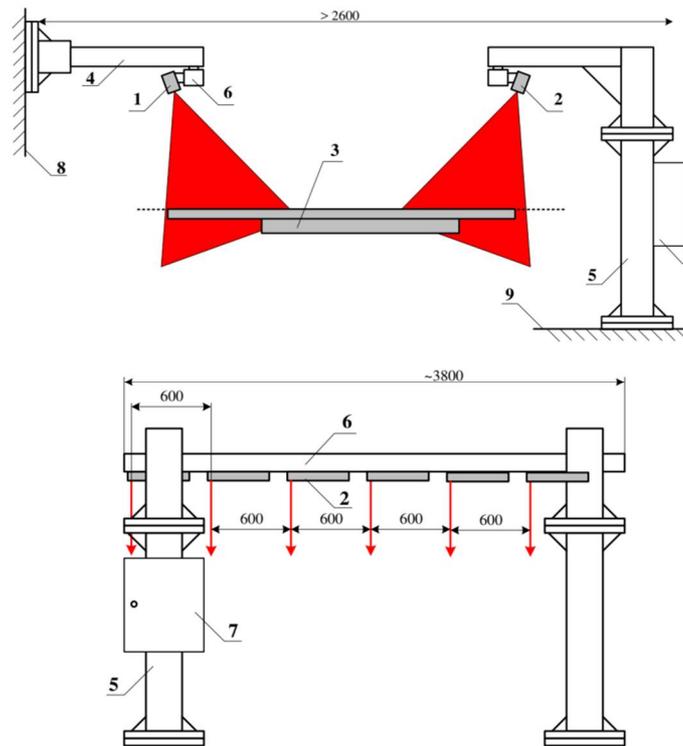


Рисунок 2 – Эскиз системы

(1 – профилометры 6 шт. левой стойки; 2 - профилометры 6 шт. правой стойки;
3 – измеряемые листы; 4 – левая измерительная стойка; 5 – правая измерительная стойка;
6 – балка подвеса профилометров; 7 – электрошкаф питания и коммутации; 8 – стенка несущей металлоконструкции листоукладчика; 9 – поверхность установки роликов либо бетонный пол)

Figure 2 – System sketch

(1 – 6 pcs. profilometers of left rack; 2 - 6 pcs. profilometers of right rack; 3 – measured sheets;
4 – left measuring rack; 5 – right measuring rack; 6 – profilometer suspension beam; 7 – power supply and switching cabinet; 8 – wall of load-bearing metal structure of metal sheet;
9 - installation surface rollers or floor)

2-D Модель листа

Для построения математической модели границ виртуального листа металла с помощью оптических сенсоров (профилометров), оценивания ширины и серповидности листа необходимо задать уравнения краев листа. Введем систему координат Oxy следующим образом: начало координат – точку O – совместим с первым сенсором, ось Ox направим вдоль листа в предположении прямолинейности его краев, ось Oy – перпендикулярно к оси Ox , т.е. коллинеарно поперечному сечению листа металла. Введем в рассмотрение две модели границ (продольных краев) листа – параболическую:

$$y_1(x) = a + b \cdot (x - x_0)^2, \quad (1)$$

$$y_2(x) = 1000 + y_1(x) \quad (2)$$

и экспоненциальную:

$$y_1(x) = A \cdot \exp(-\alpha(x - x_0)^2), \quad (3)$$

$$y_2(x) = 1000 + y_1(x) \quad (4)$$

Здесь (1) и (3) – уравнения ближнего края листа, (2) и (4) – дальнего края. Параболическая модель имитирует простую серповидность в соответствии с определением в ГОСТ [4]. Экспоненциальная модель листа позволяет моделировать несколько волн.

На рисунке 3 приведено изображение параболических границ листа при значениях параметров $a = 40$ мм, $x_0 = 6000$ мм, значение параметра b находится из уравнения (1) при условии $y(0) = 0$. Длина листа равна 12000 мм (12 м).

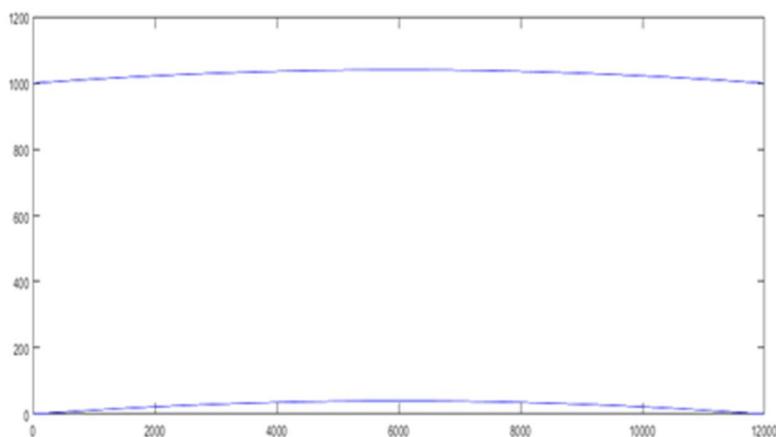


Рисунок 3 – Параболическая модель границ листа
Figure 3 – Parabolic model of sheet boundaries

На рисунке 4 приведено изображение границ листа по модели (3), (4) при значениях параметров $A = 40$ мм, $x_0 = 6000$ мм, значение параметра α находится из уравнения (3) при условии $y(0) = \varepsilon$, $\varepsilon = 0,1$ по формуле $\alpha = \frac{\ln A - \ln \varepsilon}{(0 - x_0)^2}$. В данном примере

$$\alpha = \frac{\ln 40 - \ln 0,1}{(0 - 6000)^2} = 1,6643 \cdot 10^{-7}.$$

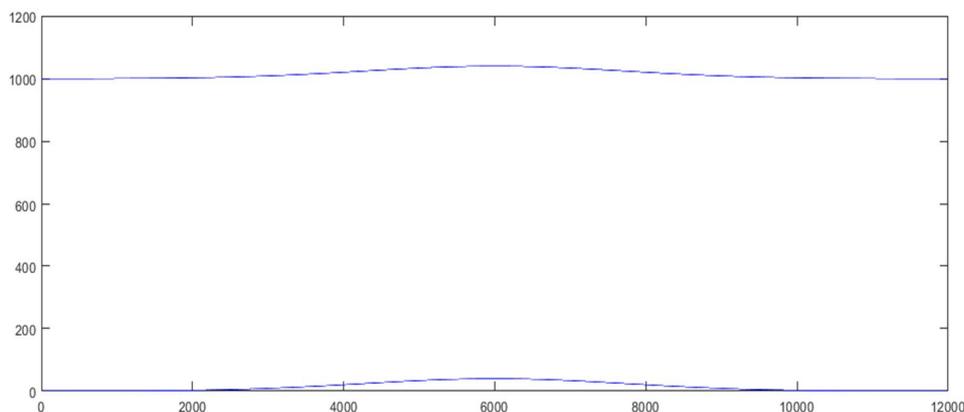


Рисунок 4 – Экспоненциальная модель границ листа
Figure 4 – Exponential model of sheet boundaries

Алгоритм построения профиля листа по отдельным измерениям

Исходными данными для восстановления профиля листа являются наборы из N (в случае длины листа, равной 12 000 мм, $N = 16$) шестерок пар точек $\{(x_k, y_k)\}_{k=1}^6$. Задача состоит в последовательном восстановлении профиля листа по всей его длине по указанному набору. В процессе восстановления профиля необходимо учесть, что лист металла при его движении по рольгангу может совершать небольшие вращательные движения и совершать поперечные смещения. Поэтому каждая новая шестерка точек от профилметров может быть повернута

на некоторый угол относительно предыдущей шестерки точек и смещена в поперечном направлении (вдоль оси Oy). Для совмещения (сшивания) ее с предыдущим набором необходимо найти угол поворота и величину поперечного смещения.

Общая схема алгоритма для восстановления профиля листа в случае, когда профилометры расположены на расстоянии 600 мм друг от друга, такова.

1. Выяснить наличие поворота очередной $(n+1)$ -й шестерки точек относительно предыдущей n -й и, если имеет место поворот, то найти угол поворота между последовательными n -м и $(n+1)$ -м наблюдениями (шестерками точек).

2. Выполнить поворот $(n+1)$ -й шестерки точек на найденный угол с учетом его знака.

3. Выяснить наличие поперечного смещения между последовательными n -й и $(n+1)$ -й шестерками точек.

4. Выполнить сдвиг $(n+1)$ -й шестерки точек на величину найденного поперечного смещения.

На рисунке 5 показано последовательное «сшивание» нового поступающего отсчета с уже восстановленным профилем. Кривая сверху имитирует данные, получаемые от шести профилометров, где каждый следующий отсчет может содержать случайное искажение (поворот и смещение по оси Oy), кривая снизу – восстановленный профиль.

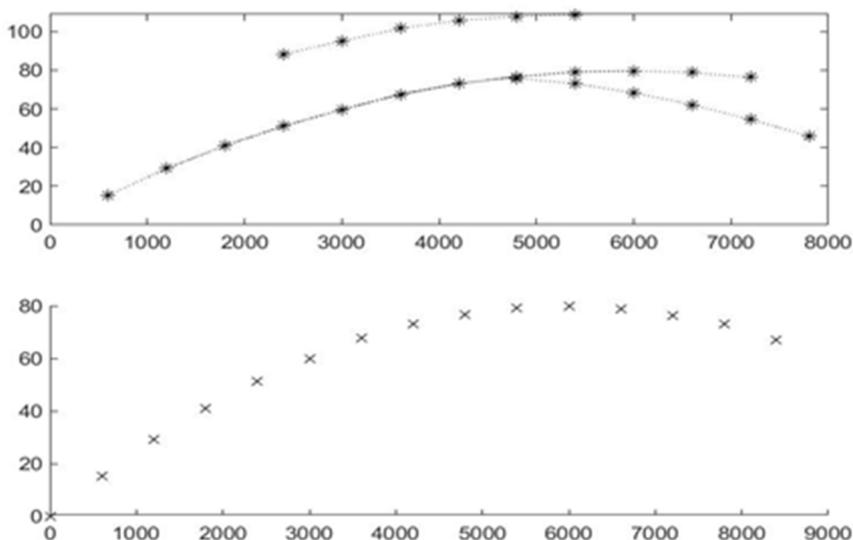


Рисунок 5 – Иллюстрация сшивания шестерок точек в единый профиль

Figure 5 – Illustration of stitching six dots into a single profile

Алгоритм нахождения угла поворота

Для нахождения угла поворота очередной шестерки точек с целью совмещения с предыдущими шестью точками, уже вписанными в формируемый профиль края листа, выполняются следующие действия.

1. Находятся координаты (x_0, y_0) точки M_0 , относительно которой будет выполняться поворот:

$$x_0 = \frac{1}{6} \sum_{t=1}^6 x_{nov}(t), \quad y_0 = \frac{1}{6} \sum_{t=1}^6 y_{nov}(t). \quad (5)$$

Здесь $x_{nov}(t)$, $y_{nov}(t)$, $t = \overline{1,6}$ – координаты точки M_t в составе новой шестерки точек.

2. Вычисляются координаты направляющих векторов прямых, соединяющих соответственно первую и шестую точки отдельно для предыдущей и новой шестерок точек:

$$\begin{aligned} x_s &= x_{star}(1) - x_{star}(6); & y_s &= y_{star}(1) - y_{star}(6); \\ x_n &= x_{nov}(1) - x_{nov}(6) & y_n &= y_{nov}(1) - y_{nov}(6). \end{aligned} \quad (6)$$

3. Вычисляется угол поворота:

$$\beta = \arccos \left(\frac{x_s \cdot x_n + y_s \cdot y_n}{\sqrt{x_s^2 + y_s^2} \cdot \sqrt{x_n^2 + y_n^2}} \right). \quad (7)$$

4. В цикле по t от 1 до 6 выполняется поворот каждой точки из состава новой шестерки точек на найденный угол β по формулам:

$$X_{nov1} = X_0 + T \cdot X_{nov}, \quad (8)$$

$$X_{nov1}(t) = \begin{pmatrix} x_{nov1}(t) \\ y_{nov1}(t) \end{pmatrix}, \quad T = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix}, \quad X_{nov}(t) = \begin{pmatrix} x_{nov}(t) \\ y_{nov}(t) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Здесь: $X_{nov}(t)$ – вектор координат t -й точки в составе новой шестерки точек до поворота;

T – матрица поворота шестерки точек на угол β ; $X_{nov1}(t)$ – координат t -й точки в составе новой шестерки точек после поворота на угол β .

Алгоритм нахождения и устранения поперечного смещения

После поворота каждой из шести точек нового набора может образоваться поперечное смещение этой шестерки точек относительно сформированного профиля листа. Поперечное смещение листа может возникнуть и независимо от поворота (рисунок 6). Для устранения поперечного смещения новой шестерки точек выполняются следующие действия.

1. Обнаруживается и фиксируется величина смещения. Для этого в цикле по t от 1 до 6 находим уклонения по высоте (ширине листа), т.е. по координате y ординат $y_{nov1}(t)$ от отвечающих им ординат $y_{star}(y)$:

$$\delta(t) = y_{nov1}(t) - y_{star}(t), \quad t = \overline{1, 6}.$$

2. Вычисляем среднее значение из найденных шести значений $\delta(1), \delta(2), \dots, \delta(6)$:

$$\delta_{sr} = \frac{1}{6} \sum_{t=1}^6 \delta(t).$$

3. Проверяем наличие поперечного смещения и, если оно обнаруживается, то «выбираем» его:

$$\begin{aligned} \text{if}(\text{abs}(\delta_{sr}) > \delta) & \text{ то в цикле по } t \text{ от } 1 \text{ до } 6 \\ y_{nov11}(t) &= y_{nov1}(t) + \delta_{sr}, \quad t = \overline{1, 6}. \end{aligned}$$

На рисунке 6 иллюстрация поворота ближнего края листа на $-0,2^\circ$ (по ходу часовой стрелки). Красным цветом выделена истинная граница края листа, синим – повернутая на указанный угол.

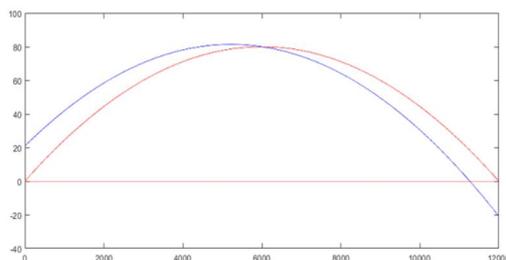


Рисунок 6 – Иллюстрация поворота листа металла на $-0,2^\circ$

Figure 6 – Illustration of metal sheet rotation by $-0,2^\circ$.

Алгоритм обнаружения и корректировки некорректных точек

Пусть $(x_{nov}(1), y_{nov}(1)), (x_{nov}(2), y_{nov}(2)), \dots, (x_{nov}(6), y_{nov}(6))$ – координаты очередной шестерки точек. Среди этих точек могут быть точки с некорректными измерениями координат (координаты y). Для обнаружения таких точек предлагается следующий алгоритм.

1. По поступившим шести точкам вычисляются коэффициенты аппроксимирующей функции в виде многочлена второй степени (параболы)

$$\hat{y}(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2, \quad t = \overline{1, 6}. \quad (10)$$

Оценки коэффициентов находятся стандартным методом наименьших квадратов [7].

2. Вычисляются смещения оценок $\hat{y}(t)$ аппроксимирующей кривой в каждой точке относительно значений ординат $y_{nov}(t)$:

$$\varepsilon(t) = \hat{y}(t) - y_{nov}(t), \quad t = \overline{1, 6}.$$

3. Если для всех значений t , т.е. для всех точек модуль смещения меньше заданного порога $abs(\varepsilon(t)) < \Delta$, $t = \overline{1, 6}$, то некорректных точек нет. В противном случае переходим к пункту 4 алгоритма.

4. Находим наиболее удаленную точку от аппроксимирующей кривой

$$tkr = \arg \max_{t=\overline{1, 6}} abs(\varepsilon(t)).$$

5. Удаляем эту точку из набора, т.е. оставляем 5 точек. По этим пяти точкам вновь находим коэффициенты аппроксимирующей функции в виде многочлена второй степени (параболы):

$$\hat{y}_1(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2, \quad t = \overline{1, 5}.$$

6. Вычисляем смещения $\varepsilon(t) = \hat{y}_1(t) - y_{nov}(t)$, $t = \overline{1, 5}$ оценок $\hat{y}_1(t)$ и проверяем выполнение условий $abs(\varepsilon(t)) < \Delta$, $t = \overline{1, 5}$.

7. Если все смещения находятся в пределах допуска, то заменяем некорректную точку [некорректную ординату $y(tkr)$] на новое значение $y(tkr) = \hat{y}_1(tkr)$.

Приведем в кратком изложении процедуру оценивания коэффициентов $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2$ модели (10). Пусть $\{x_k, y_k\}_{k=1}^6$ – множество, состоящее из 6 точек. Необходимо найти оптимальные значения оценок $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2$ коэффициентов a_0, a_1, a_2 аппроксимирующего многочлена (10).

Оптимальные значения оценок $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2$ коэффициентов a_0, a_1, a_2 будем искать из условия

$$f(a_0, a_1, a_2) = \sum_{k=1}^K \left(y_k - (a_0 + a_1 x_k + a_2 x_k^2) \right)^2 \rightarrow \min_{a_0, a_1, a_2}.$$

Вычислив частные производные функции $f(a_0, a_1, a_2)$ по неизвестным (параметрам) a_0, a_1, a_2 , получим нормальную систему уравнений

$$\begin{pmatrix} K & \sum_{k=1}^K x_k & \sum_{k=1}^K x_k^2 \\ \sum_{k=1}^K x_k & \sum_{k=1}^K x_k^2 & \sum_{k=1}^K x_k^3 \\ \sum_{k=1}^K x_k^2 & \sum_{k=1}^K x_k^3 & \sum_{k=1}^K x_k^4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^K y_k \\ \sum_{k=1}^K x_k y_k \\ \sum_{k=1}^K x_k^2 y_k \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Основная матрица системы линейных алгебраических уравнений (11) является симметричной и положительно определенной. Решать ее можно и методом Гаусса, но предпочтительнее методом, предназначенным для решения симметричных систем [8, 9]. Например, методом квадратного корня [8].

Алгоритм определения ширины и серповидности листа металла

Границы листа металла, как отмечалось выше, могут быть получены в виде разреженного множества точек и в виде «плотного» множества точек. В первом случае точки границы отстоят друг от друга на 600 мм, а во втором – на 5 мм. Соответственно ширину листа металла и величину серповидности можно измерить на каждом из этих множеств. Ширина $h(x_i)$ в произвольной точке M_i с абсциссой x_i находится вычитанием из ординаты $y_2(x_i)$ данной точки по дальней границе ординаты $y_1(x_i)$ этой точки на ближней границе:

$$h(x_i) = y_2(x_i) - y_1(x_i). \quad (12)$$

Серповидность листа металла можно вычислить также между любыми двумя точками из двух указанных множеств точек – разреженного и плотного. Пусть $\{(x_k, y_k)\}_{k=1}^K$ – множество точек границы листа. Требуется измерить «серповидность» на участке границы между двумя заданными точками $M_1(x_{k_1}, y_{k_1})$ и $M_2(x_{k_2}, y_{k_2})$ $k_1 < k_2$, $k_1, k_2 \in \{1, 2, \dots, K\}$. Для этого необходимо записать уравнение прямой L , проходящей через точки $M_1(x_{k_1}, y_{k_1})$ и $M_2(x_{k_2}, y_{k_2})$. Для упрощения обозначений переобозначим координаты точек M_1 и M_2 : $M_1(x_1, y_1)$ и $M_2(x_2, y_2)$.

Пусть L : $Ax + By + C = 0$ – искомое уравнение.

Коэффициенты A , B , C этого уравнения находим по формулам: $A = y_2 - y_1$, $B = x_1 - x_2$, $C = A \cdot (-x_1) - B \cdot y_1$.

1. Уклонение (расстояние) $d(x)$ каждой точки M_i , расположенной между точками M_1 и M_2 , находим по формуле:

$$d(x_i) = \frac{|Ax_i + By_i + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad i = \overline{1, K}. \quad (13)$$

2. Вычисляем максимальное уклонение точек границы на указанном участке между точками M_1 и M_2 :

$$d_{\max} = \max_i d(x_i). \quad (14)$$

Для получения оценки глобальной «серповидности» нужно взять в качестве точек M_1 и M_2 первую и последнюю точки границы выполнить пункты 1–3 алгоритма.

Рассмотрим пример вычисления серповидности листа металла, границы которого задаются уравнениями:

$$\begin{aligned} y_1(x_i) &= 80 - 2 \cdot (2) \cdot 10^{-6} \cdot (x_i - 6000)^2, \quad x_i = 0, 5, 10, \dots, 12000; \\ y_2(x_i) &= 1000 + y_1(x_i). \end{aligned} \quad (15)$$

Экспериментальные исследования

Оценим серповидность листа на промежутке от 500 мм до 10000 мм (от 0,5 м до 10 м). Координаты начальной и конечной точек на ближнем крае листа в соответствии с формулами (15) таковы: $M_1(500; 12,78)$, $M_2(10000; 44,44)$. Уравнение прямой, соединяющей эти точки, имеет следующий вид $L: y = 8,8899 + 0,0036x$.

Эта прямая (красный цвет) вместе с границей краев листа (голубой цвет) приведена на рисунке 7. Максимальное уклонение точек ближнего края листа от этой прямой (показатель локальной серповидности) на промежутке 0,5 м – 10 м равно **51,2 мм**.

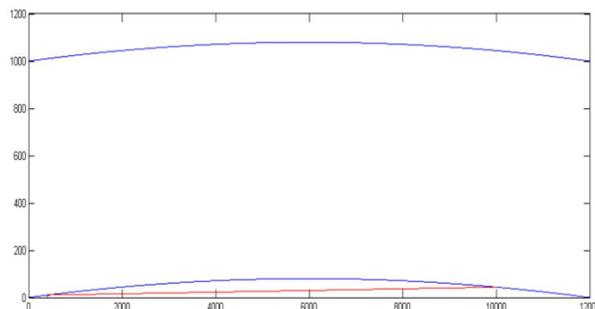


Рисунок 7 – Иллюстрация оценивания локальной серповидности на промежутке 0,5 м... 10 м ($d_{\max} = 51,20\text{мм}$)

Figure 7 – Illustration of estimating local sickle shape at an interval of 0,5 m... 10 m ($= 51,20\text{ mm}$)

Оценка быстродействия алгоритма производилась экспериментальным путем, в качестве среды реализации был выбран пакет Matlab. Среднее время, необходимое для сшивания отдельных шестерок точек в единый профиль листа металла, зависит от расстояния между соседними шестерками. Учитывая технические ограничения, существующие в системе, это расстояние варьируется в пределах от 5 мм до 600 мм. Учитывая, что скорость движения листа может составлять до 2 м/с и на прохождение листа длиной 12 м требуется время, равное 6 с, время, затрачиваемое на обработку, не должно превышать этого предельного значения.

Усредненное время, необходимое на обработку точек, поступающих с интервалом в 600 мм, составляет 60 – 65 мс, при увеличении частоты поступления новых шестерок и снижении интервала до 5 мм это время возрастает до 750 – 770 мс. Полученные значения позволяют сделать вывод о возможности применения данных алгоритмов для решения задачи в реальных условиях применения даже с учетом дополнительных затрат времени на коммутацию и передачу данных.

Заключение

Рассмотрен подход к определению в автоматическом режиме ширины и серповидности листа металла с использованием системы оптических сенсоров. Сенсоры формируют множество точек границ листа. Однако непосредственно по этому множеству точек определять ширину и величину серповидности нельзя. Из-за вращений и поперечных смещений листа в процессе движения по рольгангу нарушается «гладкость» границы. Соседние наборы из шестерок точек оказываются смещенными относительно друг друга.

Для формирования гладкой границы краев листа предложена математическая модель, учитывающая вращения и поперечные смещения. Проведены исследования модели при различных сочетаниях вращений и поперечных смещений, а также обнаружение и отбраковка некорректных измерений. Дальнейшее развитие предлагаемых подходов может быть связано с построением и определением параметров листа металла как трехмерного объекта с целью определения его пространственных характеристик [10-12].

Библиографический список

1. Бельский С.М., Мухин Ю.А., Польшин А.А., Стоякин А.О. Математическая модель профиля поперечного сечения горячекатаных полос с прикромочными особенностями. Сообщение 1 // Производство проката. 2015. № 5. С.18-22.
2. Бельский С.М., Мухин Ю.А., Польшин А.А., Стоякин А.О. Математическая модель профиля поперечного сечения горячекатаных полос с прикромочными особенностями. Сообщение 2 // Производство проката. 2015. № 6. С.10-13.
3. Стоякин А.О. Исследование формирования клиновидности и серповидности стальных полос для повышения устойчивости процесса прокатки // Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. М.: ИМЕТ РАН, 2019, 20 с.

4. Металлопродукция. Методы измерения отклонений формы. ГОСТ 26877-91. Комитет стандартизации и метрологии СССР. Москва. 1992.
5. **Венедиктов А.З., Демкин В.Н., Доков Д.С.** Свидетельство 18850 РФ, МКИ G01B21/00. Лазерный профилометр - №2000121767/20; Заявл. 14.08.00; Оpubл. 20.07.01 Бюл. 20.
6. **Венедиктов А.З., Демкин В.Н., Доков Д.С.** Свидетельство 18851 РФ, МКИ G01C3/00. Лазерный дальномер - №2000121768/20; Заявл. 14.08.00; Оpubл. 20.07.01 Бюл. 20.
7. **Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.** Прикладная статистика. Исследование зависимостей / под ред. проф. С.А. Айвазяна. М.: Финансы и статистика, 1985. 487 с.
8. **Демидович Б.П., Марон И.А.** Основы вычислительной математики. М.: Наука, 1966. 664 с.
9. **Икрамов Х.Д.** Численные методы для симметричных линейных систем. М.: Наука, 1988. 160 с.
10. **Novikov A.I., Efimov A.I., Kolchaev D.A.** 3D IMAGE COMBINATION IN AVIATION COMPUTER VISION SYSTEMS // CEUR Workshop Proceedings. IPERS-ITNT 2018. 2018. p. 56-66.
11. **Ефимов А.И., Колчаев Д.А., Новиков А.И.** Итерационный алгоритм совмещения трехмерных облаков точек // Методы и средства обработки и хранения информации. Рязань: РГРТУ. 2018. С. 139-142.
12. **Новиков А.И., Ефимов А.И.** Совмещение 3d-изображений в пространстве // 7-я международная научно-техническая конференция "К.Э.Циолковский - 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика". 2017. С. 377-382.

UDC 004.932: 519.64

MATHEMATICAL MODEL FOR AUTOMATIC DETERMINATION OF WIDTH AND SICKLE SHAPE OF METAL SHEET

A. I. Novikov, Dr in technical sciences, full professor, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-8166-8234, e-mail: novikovanatoly@yandex.ru

D. S. Dokov, CEO in LLC «Coherent», Ryazan, Russia;

orcid.org/0009-0006-6729-0788, e-mail: dokov@mail.ru

A. I. Efimov PhD (in technical sciences), associate professor, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-4014-8718, e-mail: lexie62rus@mail.ru

M. B. Nikiforov, PhD (in technical sciences), associate professor, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-4796-0776, e-mail: nikiforov.m.b@mail.ru

*The task to construct a mathematical model of metal sheet in the process of its movement along a roller is considered. A sheet of metal after it is rolled on mill can change its edge geometry as a result of which the phenomenon of sickle shape may occur. Traditionally, sickle shape and width of a sheet are measured manually. To automate the process of measuring width and sickle shape, a system based on a set of optical sensors (profilometers) is proposed. Data processing should be performed in a time not exceeding the time required to pass the entire sheet. The difficulties of estimating these parameters based on these data are associated with rotations and transverse displacements in the process of moving the sheet along the roller. **The aim is to create an adequate model of a metal sheet in order to test algorithms for determining its characteristics: width, sickle shape, presence of other defects. The issues of constructing a general profile based on data from individual measurements of a system containing six profilometers are considered, as well as a description of algorithms for finding the angle of rotation, eliminating transverse displacements, estimating sickle shape and width of metal sheet are considered***

Keywords: profilometer, 2-D sheet model, model of sheet rotations, detection of non-contact points, sickle shape, sickle shape estimation, metal sheet edges approximation.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-88-74-84

References

1. **Bel'skij S.M., Muhin Ju.A., Pol'shin A.A., Stojakin A.O.** Matematicheskaja model' profilja poperechnogo sechenija gorjacekatanyh polos s prikromochnymi osobennostjami. Soobshhenie 1. *Proizvodstvo prokata*. 2015. no. 5, p. 18-22. (in Russian).
2. **Bel'skij S.M., Muhin Ju.A., Pol'shin A.A., Stojakin A.O.** Matematicheskaja model' pro-filja poperechnogo sechenija gorjacekatanyh polos s prikromochnymi osobennostjami. Soobshhenie 2. *Proizvodstvo prokata*. 2015. no. 6. pp. 10-13. (in Russian).
3. **Stojakin A.O.** Issledovanie formirovanija klinovidnosti i serpovidnosti stal'nyh polos dlja povysheni-ja ustojchivosti processa prokatki. *Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni k.t.n. M.: IMET RAN*, 2019, 20 p. (in Russian).
4. Metalloprodukcija. Metody izmerenija odklonenij formy. GOST 26877-91. *Komitet standar-tizacii i metrologii SSSR*. Moskva. 1992. (in Russian).
5. **Venediktov A.Z., Demkin V.N., Dokov D.S.** Svidetel'stvo 18850 RF, MKI G01B21/00. Lazernyj profilometr - № 2000121767/20; Zajavl. 14.08.00; Opubl. 20.07.01 Bjul. 20. (in Russian).
6. **Venediktov A.Z., Demkin V.N., Dokov D.S.** Svidetel'stvo 18851 RF, MKI G01S3/00. Lazernyj dal'nomer - № 2000121768/20; Zajavl. 14.08.00; Opubl. 20.07.01 Bjul. 20. (in Russian).
7. **Ajvazjan S.A., Enjukov I.S., Meshalkin L.D.** Prikladnaja statistika. Issledovanie zavisi-mostej / pod red. prof. S.A. Ajvazjana. M.: *Finansy i statistika*, 1985, 487 p. (in Russian).
8. **Demidovich B.P., Maron I.A.** Osnovy vychislitel'noj matematiki. M.: Nauka, 1966, 664 p (in Russian).
9. **Ikramov H.D.** Chislennye metody dlja simmetrichnyh linejnyh sistem. M.: Nauka, 1988. 160 p. (in Russian).
10. **Novikov A.I., Efimov A.I., Kolchaev D.A.** 3D IMAGE COMBINATION IN AVIATION COMPUTER VISION SYSTEMS // CEUR Workshop Proceedings. IPERS-ITNT 2018, pp. 56-66.
11. **Efimov A.I., Kolchaev D.A., Novikov A.I.** Iteracionnyj algoritm sovmeshhenija treh-mernyh obla-kov toчек. Metody i sredstva obrabotki i hranenija informacii. Rjazan': RGRU. 2018, pp. 139-142. (in Russian).
12. **Novikov A.I., Efimov A.I.** Sovmeshhenie 3d-izobrazhenij v prostranstve. *7-ja mezhduna-rodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija "K.Je.Ciolkovskij - 160 let so dnja rozhdenija. Kosmonav-tika. Radi-ojelektronika. Geoinformatika"*. 2017, pp. 377-382. (in Russian).