

ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

УДК 004.045:004.932

Л.В. БОВНЕГРА, канд. техн. наук,
П.А. СТАНОВСКИЙ, канд. техн. наук,
Ю.В. ШИХИРЕВА, Одесса, Украина

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ПОМОЩЬЮ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВИДЕОПОТОКА СО СХОДЯЩЕЙ СТРУЖКИ

Для оцінки стану ріжучого інструменту в міру його зношування запропоновано використовувати відеозйомку стружки, що сходить, з наступним параболічним перетворенням отриманого при цьому відеопотоку. Показаний метод навчання системи діагностики стану інструмента. Визначені параметри налаштувань перетворення та запропонований критерій працездатності інструмента.

Для оценки состояния режущего инструмента по мере его износа предложено использовать видеосъемку сходящей стружки с последующим параболическим преобразованием полученного при этом видеопотока. Показан метод обучения системы диагностики состояния инструмента. Определены параметры настроек преобразования и предложен критерий работоспособности инструмента.

For an estimation of the cutting tool condition in process of its deterioration it is offered to use videoshooting of a descending shaving with the subsequent parabolic transformation received thus videostream. The method of the preliminary treatment of the tool condition system training is shown. Parameters of the transformation options are defined and the tool working capacity criterion is offered.

Професіональний токар завжди зможе «на глазок» визначити момент, коли знос режущого інструмента перевищив допустимі норми, і його слід заточити або замінити. Однак сучасні автоматизовані підприємства потребують зовсім в іншому підході: оцінку ступеня зносу інструмента необхідно виконувати автоматично, в процесі роботи станка.

В останнє час з'явилися роботи, в яких оцінку стану режущого інструмента виробляють, досліджуючи зображення зони його зносу [1]. Такий підхід володіє, по крайній мірі, двома суттєвими недоліками:

- во-первых, для визуализации изображения необходимо остановить станок, снять инструмент, сфотографировать его и установить на место, что требует затрат времени и представляет собой грубое вмешательство в производственный процесс;

- одиночное изображение малоинформативно, и по нему трудно судить о работоспособности инструмента на момент фотографирования.

Поэтому *целью настоящей работы* было создание условий для оценки степени износа металлорежущего инструмента с помощью анализа не отдельной фотографии, а кадров видеопотока из зоны резания, то есть по видеоизображению сливной стружки (рис. 1).

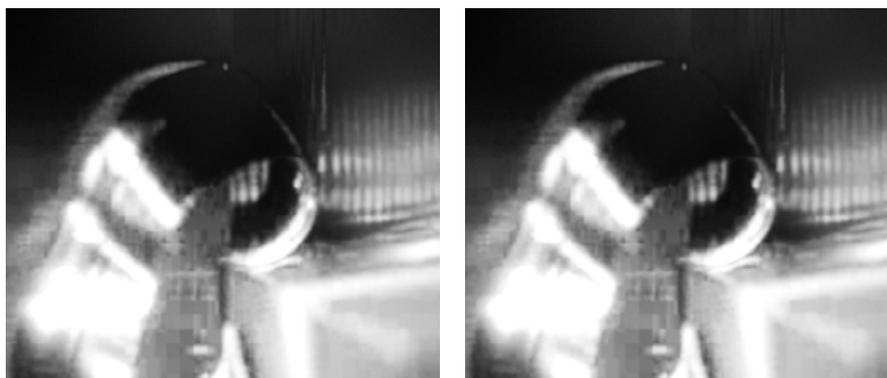


Рисунок 1 – Видео сливной стружки из зоны резания: два смежных кадра видеопотока

Для практической реализации этой цели выбор двух кадров видеопотока начинается с задания пользователем начальной длины $L_{\text{Енач}}$ (измеренной в количестве кадров; $L_{\text{Енач}} \geq 2$) элементарного интервала видеопотока (ЭИВ), в рамках которого осуществляется оценивание существенности изменений в последнем. В работе принимали начальную длину $L_{\text{Енач}} = 50$.

Длина интервала $L_{\text{Енач}}$ и частота кадров f_k определяли начальный интервал времени между проверками существенности изменений видеопотока:

$$\tau_{\text{Снач}} = L_{\text{Енач}} / f_k \quad (1)$$

При $f_k = 25$ 1/с и $L_{\text{Енач}} = 50$ имеем $\tau_{\text{Снач}} = 2$ с. Дальнейшая адаптация системы к скорости изменения изображения состояла в изменении длины ЭИВ и расстояния между двумя кадрами:

$$L_{\text{Еадапт}} = \text{Int} \left(L_{\text{Енач}} \frac{v_2}{v_1} \right), \quad (2)$$

где $v_{\text{пр}}$ – скорость изменения изображения между кадрами в предыдущем ЭИВ, v – вычисляется по формуле:

$$v = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \Delta z_{ij}}{NM \Delta \tau} \left[\frac{\text{единица яркости}}{\text{с} \cdot \text{пикс}^2} \right], \quad (3)$$

$\Delta \tau$ – промежуток времени между кадрами видеопотока; Δz_{ij} – изменение яркостей соответствующих пикселей с координатами i и j за время $\Delta \tau$.

Оценим максимально возможное значение v . Оно достигается тогда, когда все пиксели за один кадр ($\Delta \tau = 1$) меняются от 0 до 255 или наоборот. Из (3) вытекает, что $v_{\max} = 255$.

Дальше осуществляется выбор двух кадров в пределах ЭИВ и применяли к ним параболическое преобразование [2].

Параболическое преобразование начинается с бинаризации двух избранных кадров. Результатом бинаризации получается изображение, созданное из пикселей двух цветов: чаще всего, белого и черного:

$$z'_{ij} = 255 \left| \begin{array}{l} z_{ij} \geq z_b \\ z_{ij} < z_b \end{array} \right. ; \quad z'_{ij} = 0 \left| \begin{array}{l} z_{ij} \geq z_b \\ z_{ij} < z_b \end{array} \right. \quad (4)$$

где z_{ij} – яркость соответствующего пикселя начального изображения до бинаризации; z'_{ij} – яркость пикселя изображения после бинаризации; z_b – порог бинаризации.

В некоторых случаях, когда после бинаризации кадр содержал вместо черного почти сплошной белый фон, его подвергали инверсии.

Дальше рассмотрим параболическое уравнение следующего вида:

$$\frac{\partial z}{\partial \tau} = D_p \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right), \quad (5)$$

Пусть x , y и τ интерпретируются как пространственно-временные координаты некоторого p -го пикселя отдельного кадра видеопотока яркостью $z_{x,y,\tau}$. В выражении (5) D_p – некоторый коэффициент, который имеет конкретное значение для конкретного пикселя. Разностный кадр является результатом изменения яркостей пикселей Δz за время $\Delta \tau$, которое прошло между кадрами 2 и 1, то есть сам разностный кадр в некотором смысле представляет собой численное приближение «производной» яркости каждого пикселя по времени:

$$\frac{\delta z}{\delta \tau} \Leftrightarrow \frac{\Delta z}{\Delta \tau}; \quad \Delta z = z_2 - z_1; \quad \Delta \tau = \tau_2 - \tau_1. \quad (6)$$

Однако яркость z является функцией не только времени, но еще и (для плоского изображения) двух координат: x и y . Поэтому выражение (6) может быть расширено еще и за счет пространственных производных:

$$\frac{\delta z}{\partial x} \Leftrightarrow \frac{\Delta z}{\Delta x}; \quad \frac{\delta z}{\partial y} \Leftrightarrow \frac{\Delta z}{\Delta y}. \quad (7)$$

Соответственно и разностные кадры могут быть трех типов: один во времени и два в пространстве.

Поскольку Δx , Δy , $\Delta \tau$ и Δz дискретны, заменим непрерывные переменные x , y и τ их дискретными значениями:

$$\begin{aligned} x &\Leftrightarrow i, & i &= 0, 1, 2, \dots, n \text{ с шагом в 1 пиксель;} \\ y &\Leftrightarrow j, & j &= 0, 1, 2, \dots, m \text{ с шагом в 1 пиксель;} \\ \tau &\Leftrightarrow k, & k &= 0, 1, 2, \dots, K \text{ с шагом в 1 кадр.} \end{aligned} \quad (8)$$

Яркость пикселя также будет принимать дискретные значения:

$$z_{i,j,k} \Leftrightarrow z(i, j, k). \quad (9)$$

Введение дискретных значений перечисленных выше величин приводит к следующим приближенным формулам для «производных»:

$$\frac{dz_{i,j}}{d\tau} \Leftrightarrow \frac{z_{(k+1),i,j} - z_{k,i,j}}{\Delta k}; \quad (10)$$

$$D_{i,j} \left(\frac{\partial^2 z_{i,j}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z_{i,j}}{\partial y^2} \right) \Leftrightarrow D_{i,j} \left(\frac{z_{(i+1),j,k} - 2z_{i,j,k} + z_{(i-1),j,k}}{\Delta i^2} + \frac{z_{i,(j+1),k} - 2z_{i,j,k} + z_{i,(j-1),k}}{\Delta j^2} \right), \quad (11)$$

и с учетом того, что $\Delta_i = \Delta_j = \Delta_k = 1$, получаем следующее уравнение:

$$D_{i,j} = \frac{z_{i,j,(k+1)} - z_{i,j,k}}{z_{(i+1),j,k} + z_{(i-1),j,k} + z_{i,(j+1),k} + z_{i,(j-1),k} - 4z_{i,j,k}}. \quad (12)$$

Коэффициентов $D_{i,j}$ в изображении столько, сколько в нем пикселей. Пронормировав их от 0 до 255 с помощью выражения

$$z_{i,j}^p = \text{Int} \left(256 \frac{|D_{i,j} - D_{\min}|}{|D_{\max} - D_{\min}|} \right), \quad (13)$$

получим сеточное поле дискретных яркостей $z_{i,j}^p$ размерностью $M \times N$ или, фактически, новое изображение, которое представляет собой итог параболического преобразования начального фрагмента видеопотока.

Утверждение. На границах подвижных участков изображения с постоянной на каждом участке, но разной между участками яркостью, пара-

болическое преобразование создает белую ($z = 255$) линию толщиной в 1 пиксель на общем черном ($z = 0$) фоне полученного кадра.

Доказательство. Проведем доказательство в четыре этапа. На *первом этапе* рассмотрим «белый» квадрат яркостью $z = z_{\max} = 255$ на общем «черном» квадратном поле 160×160 пикселей яркостью $z = z_{\min} = 0$, который увеличивает свой размер на один пиксель в каждую сторону за интервал между кадрами Δk . Рис. 2 а, б иллюстрирует изменение начального изображения во времени, то есть является преобразованием $\tau \Leftrightarrow k$, и дает возможность вычислить разницу $z_{i,j,(k+1)} - z_{i,j,k}$ в выражении (12).

На первом шаге преобразования начального изображения по пространству $x \Leftrightarrow i$ получаем два новых изображения, в которых белый квадрат сдвинут на 1 пиксель влево и вправо. На этом шаге вычисляем $z_{(i+1),j,k}$ и $z_{(i-1),j,k}$ для выражения (12). На втором шаге преобразования начального изображения по пространству $y \Leftrightarrow j$ получаем два новых изображения, в которых белый квадрат сдвинут на 1 пиксель вниз и вверх. На этом шаге вычисляем $z_{i,(j-1),k}$ и $z_{i,(j+1),k}$ для выражения (12).

Рассмотрим некоторый отдельный пиксель яркостью $z_{i,j,k} = 0$ возле границы перехода от «черного» к «белому» (рис. 3). Установим, как меняется яркость этого пикселя и его «соседей» в пространстве после параболического преобразования.

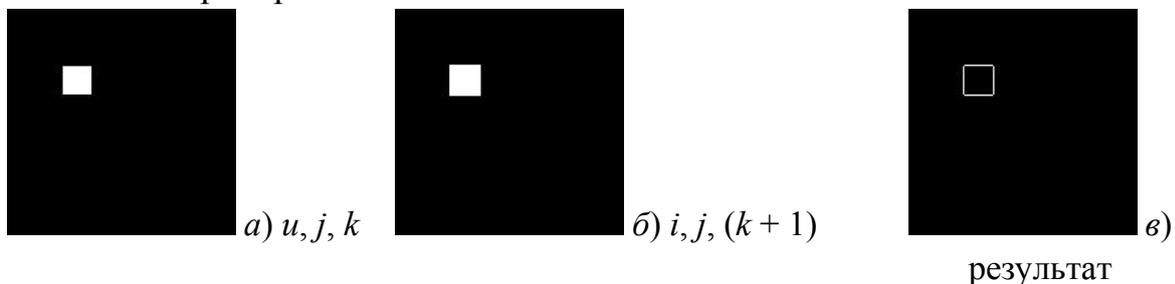


Рисунок 2 – Два последовательных кадра видеопотока с интервалом Δt , отобранные для параболического преобразования (а, б) и его результат (в)

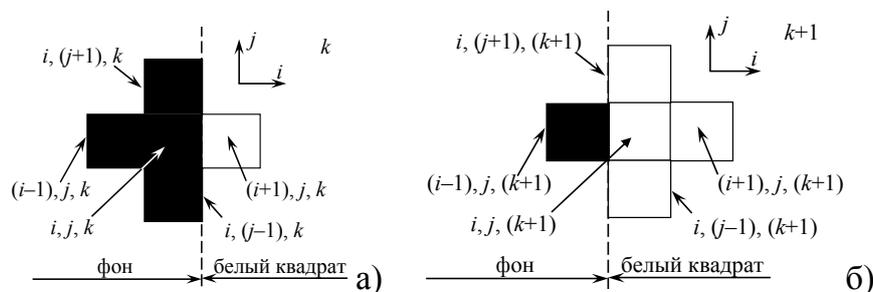


Рисунок 3 – Пиксели возле левой (по рисунку) границы белого квадрата на черном фоне: а – кадр k ; б – кадр $k + 1$.

Для этого по рис. 3 определим яркости соответствующих пикселей до преобразования (табл. 1). Рассчитаем по (12) для этих данных величину $D_{i,j}$ для пикселя $z_{i,j,k}$ на рис. 3:

$$D_{i,j} = \frac{255 - 0}{255 + 0 + 0 + 0 - 4 \cdot 0} = 1. \quad (14)$$

Таблица 1 – Начальные яркости i, j, k пикселя и его соседей до преобразования

№ п/п и позиция относительно i, j, k пикселя	Координаты пикселя	Яркость, z
1	i, j, k	0
2 (следующий кадр)	$i, j, (k + 1)$	255
3 (сосед слева)	$(i - 1), j, k$	0
4 (сосед справа)	$(i + 1), j, k$	255
5 (сосед снизу)	$i, (j - 1), k$	0
6 (сосед сверху)	$i, (j + 1), k$	0

Таким образом, яркость i, j, k пикселя после параболического преобразования изменяется с черной на белую.

На *втором этапе* оценим изменения, которые происходят с внешним слоем пикселей белого квадрата, то есть с пикселем $(i + 1), j, (k + 1)$ на рис. 3. Для этого построим табл. 2, аналогичную табл. 1.

Таблица 2 – Начальные яркости $(i + 1), j, (k + 1)$ пикселя и его соседей по преобразованию

№ п/п и позиция относительно i, j, k пикселя	Координаты пикселя	Яркость, z
1	$(i + 1), j, (k + 1)$	255
2 (следующий кадр)	$(i + 1), j, (k + 2)$	255
3 (сосед слева)	$i, j, (k + 1)$	0
4 (сосед справа)	$(i + 2), j, (k + 1)$	255
5 (сосед снизу)	$(i + 1), (j - 1), (k + 1)$	255
6 (сосед сверху)	$(i + 1), (j + 1), (k + 1)$	255

Рассчитаем по (12) для этих данных величину $D_{i,j}$ для пикселя $z_{(i+1),j,(k+1)}$:

$$D_{i,j} = \frac{255 - 255}{255 + 0 + 255 + 255 - 4 \cdot 255} = 0. \quad (15)$$

Таким образом, яркость $(i + 1), j, (k+1)$ пикселя после параболического преобразования изменяется с белой на черную.

На *третьем этапе* установим, что когда тот или другой пиксель не меняет от кадра до кадра свое значение, его яркость после параболического преобразования будет равняться 0. Это непосредственно вытекает из числителя выражения (12).

На *четвертом этапе* докажем, что значение $D_{i,j}^i$ для каждого пикселя после параболического преобразования не зависит от абсолютных значений $z_{i,j\text{до}}$ и $z_{i,j\text{после}}$, а только от их бинарного соотношения:

$$D_{i,j} = 0 \Big|_{z_{\min} = z_{\max}} ; \quad D_{i,j} = 1 \Big|_{z_{\min} \neq z_{\max}} . \quad (16)$$

Таким образом, результатом преобразования начальных изображений (рис. 1 а, б) по (12) является белый контур на черном фоне (рис. 2 в).

Поскольку в числителе (12) стоит временной градиент яркости, все неподвижные пиксели останутся нулевыми («черными»), а попытка применить параболическое преобразование к любым *одинаковым* изображениям (кадров видеопотока) приведет к получению «черного» квадрата. В результате можно считать преобразование (12) ***средством для выделения контуров только в подвижной части видеопотока.***

Использование параболического преобразования для выявления существенных изменений в видеопотоке и адаптации телекоммуникационных сетей видеонаблюдения к событиям на объекте не требует от его результатов получения любой непрерывной границы отдельных участков и есть малочувствительным к появлению ошибочных малоразмерных объектов.

Наличие результата параболического преобразования (РПП, рис. 4) предоставляет возможность выполнить его численную оценку, которую в дальнейшем можно использовать для расчетов показателя существенности.

Обработка РПП, в свою очередь, позволяет получить числовые значения мощности и дисперсии, используемые в оценке работоспособности инструмента [3].

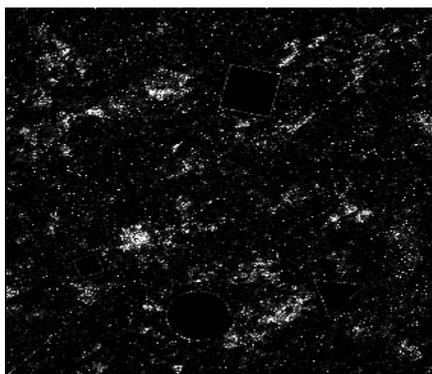


Рисунок 4 – Кадры видеопотока из зоны резания, представленные на рис. 1, после параболического преобразования

Мощность РПП оценивали как отношение количества «белых» ($z = 255$) пикселей к их общему количеству:

$$P = \frac{z_{255}}{NM} = \frac{z_{255}}{z_0 + z_{255}} \left[\frac{1}{\text{пикс}} \right]. \quad (17)$$

Статистическую дисперсию размера «белых» пятен на РПП вычисляли по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{(S_{n1} - \bar{S}_n)^2 + \dots + (S_{nm} - \bar{S}_n)^2}{n}; \quad \bar{S}_n = \frac{S_{n1} + \dots + S_{nm}}{n}, \quad (18)$$

где S_{ni} – площадь i -го пятна; $0 \leq i \leq n$. Дисперсия σ^2 существует в диапазоне $0 \leq \sigma^2 \leq NM/4$, поэтому это значение подвергали нормированию к 1.

Наличие перечисленных характеристик видеопотока позволяет рассчитать число, которое использовали в качестве комплексного критерия при адаптации систем диагностики к состоянию инструмента. Для этого использовали метрику вида:

$$M = \sqrt{(P_2 - P_1)^2 + (\sigma_2^2 - \sigma_1^2)^2}, \quad (19)$$

где индексы 1 и 2 относятся к сравниваемым видеопотокам.

Информационная технология адаптации системы диагностики к состоянию инструмента имеет две фазы деятельности: обучение и работа. При этом подвижное изображение с видеокамеры рассматривается как отдельный зрительный образ объекта наблюдения, который может находиться в двух состояниях: несущественные изменения; существенные изменения.

Во время обеих фаз выполняется параболическое преобразование пакетов от двух кадров каждого ЭИВ, но во время обучения решение о существенности изменений в фрагменте видеопотока принимает эксперт (группа экспертов).

С точки зрения работоспособности инструмента к несущественным изменениям относили:

- последствия допустимого износа инструмента;
- последствия изменения режимов резания.

К существенным изменениям относили:

- последствия недопустимого износа инструмента.

Для определения существенности в каждом конкретном случае используется метрика (19). На основании изучения информации о значении критерия существенности при наблюдении видеопотока от зоны резания устанавливали полосу значений метрики, попадание в которую во время работы системы признавали существенным изменением и инструмент снимали с эксплуатации.

Численная информация о несущественных изменениях хранится в базе данных системы автоматизированной оценки состояния инструмента.

Перечисленные выше компоненты метрического критерия (19) являются минимальным «набором» информации, которую можно получить в результате цифровой обработки РПП (рис. 4). Этот набор может быть значительно расширен, например, за счет автономного анализа отдельных фрагментов РПП, придания этим фрагментам различных весовых характеристик значимости и т.п.

Список использованных источников: 1. Методы и средства построения классификатора состояний режущих инструментов / *А.Г. Деревянченко, В.Д. Павленко, А.А. Фомин, Л.В. Бовнегра, С.В. Павленко* // Современные технологии в машиностроении. Сборник научных статей. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2007. – С. 46 – 55. 2. Тонконогий В.М. Видеообработка изображений в системе автоматического измерения дефектности износостойких покрытий на режущем инструменте / *В.М. Тонконогий, П.А. Становский* // Труды Одесского политехнического университета. – 2005. – Вып. 1(23). – С. 112 – 115. 3. Тонконогий В.М. Автоматизация измерения дефектности износостойких покрытий / *В.М. Тонконогий, П.А. Становский* // Материалы XII семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса: ОНПУ, 2005. – С. 21 – 22.