

УДК 004.045:004.932

П.А. Становский, канд. техн. наук, Одес. филиал
предпр. “Логика”,
Л.В. Бовнегра, канд. техн. наук, доц.,
Ю.В. Шихирева, магистр,
Одес. нац. политехн. ун-т

ПАРАБОЛИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОЛНОЦВЕТНОГО ВИДЕОПОТОКА ОТ ТЕПЛОВИЗОРА

П.О. Становський, Л.В. Бовнегра, Ю.В. Шихирева. **Параболічне перетворення повнокольорового відеопотоку від тепловізора.** Для оцінки стану системи “вилівок — форма” на ливарному конвейєрі запропоновано використовувати відеозйомку зовнішньої поверхні форми за допомогою тепловізора з наступним параболічним перетворенням отриманого при цьому повнокольорового відеопотоку. Запропоновано метод навчання системи діагностики стану ливарної форми. Визначено параметри настроювань перетворення і запропоновано критерій відповідності параметрів процесу технологічному проекту.

Ключові слова: параболічне перетворення, остигання ливарної форми, випромінювання від зовнішньої поверхні, відеопотік.

П.А. Становский, Л.В. Бовнегра, Ю.В. Шихирева. **Параболическое преобразование полноцветного видеопотока от тепловизора.** Для оценки состояния системы “отливка — форма” на литейном конвейере предложено использовать видеосъемку внешней поверхности формы с помощью тепловизора с последующим параболическим преобразованием полученного при этом полноцветного видеопотока. Предложен метод обучения системы диагностики состояния литейной формы. Определены параметры настроек преобразования и предложен критерий соответствия параметров процесса технологическому проекту.

Ключевые слова: остывание литейной формы, излучение от внешней поверхности, видеопоток; параболическое преобразование.

P.A. Stanovskyi, L.V. Bovnegra, Yu.V. Shikhireva. **The parabolic transformation of a full-color video-stream from the thermal imager.** To assess the condition of the system “casting — mold” on the foundry conveyor it is offered to use video filming of the external surface of the mold by means of a thermal imager with the subsequent parabolic transformation of the obtained full-color video-stream. A method of training the system of casting mold condition diagnostics is offered. The parameters of transformation settings are determined, and the criterion of compliance of the process parameters to the technological project is offered.

Keywords: casting mold cooling; radiation from the external surface; video-stream; parabolic transformation.

Введение. Современные автоматизированные предприятия остро нуждаются в экспресс-методах мониторинга технологических процессов для получения данных о скрытых параметрах последних, например, в качестве обратной связи в АСУ ТП. Как правило, такие скрытые данные невозможно получить прямым измерением, поэтому для выработки управленческих решений приходится довольствоваться косвенными характеристиками, полученными путем оценки зависимых физико-химических процессов и явлений с последующей интеллектуальной обработкой для извлечения полезной информации из неполного и зашумленного источника.

Постановка проблемы. Рассмотрим в качестве объекта управления технологический процесс изготовления отливок в песчаных литейных формах. После заливки металла основным параметром, влияющим на качество будущей отливки, является высокоинтенсивный теплообмен, о течении которого можно судить только косвенно — по температуре внешней поверхности формы.

Такой подход обладает, по крайней мере, двумя существенными недостатками:

— во-первых, для визуализации распределения температуры по поверхности формы необходимо пользоваться специальными приборами — тепловизорами, т.к. электромагнитное излучение от остывающей формы чаще всего находится вне пределов видимого спектра;

— фотография, полученная с помощью тепловизора, из-за неизбежного преобразования “3D-форма — 2D-изображение” содержит существенные искажения, и по ней трудно судить о состоянии объекта мониторинга на момент фотографирования;

— одиночная фотография малоинформативна, т.к. для постановки правильного диагноза развитие процесса гораздо важнее любого его текущего состояния.

Анализ последних достижений и публикаций. Первая из перечисленных проблем решается с помощью использования последних моделей тепловизоров. Широкий рабочий температурный диапазон этих приборов: ($-40 \dots 2000$ °C) и их высокая чувствительность ($0,03$ °C) позволяют проводить температурный мониторинг широкого класса литейных объектов: как непосредственно металла в процессе плавки, разливки, так и литейной формы [1, 2]. Важной функцией современного тепловизора является возможность получения фотографий на основе композитных видимых и инфракрасных излучений в различных сочетаниях, что облегчает анализ термограмм в случае сложных поверхностей объектов контроля.

Решение второй и третьей проблем находится в области интеллектуальных методов обработки видеoinформации [3, 4]. Прежде всего, речь идет об использовании, вместо отдельных фотографий, видеопотока. Кроме того, необходимо расширять информационную базу метода за счет использования полноцветных видеопотоков, по крайней мере, в том виде, в котором их представляет тепловизор.

Цель работы — повышение эффективности управления технологическими процессами, использующими высокоинтенсивный нагрев предмета труда и оборудования, путем включения в контур обратной связи АСУ дополнительной информации, полученной в результате параболического преобразования полноцветного видеопотока от тепловизора.

Основной материал. Как известно, сложный цвет элемента любого изображения (пикселя) z состоит из трех составляющих: красного, зеленого и синего цветов [5]. Аналитически это обозначается как $z = z(r, g, b)$, где r, g, b — интенсивности соответственно красной, зеленой и синей составляющих элемента изображения с коэффициентами, полученными по правилу баланса белого, отражающего физиологические особенности нашего зрения.

$$z = 0,299r + 0,587g + 0,114b. \quad (1)$$

Разделим равномерно каждую составляющую на 256 градаций яркости: от 0 до 255. В результате, например, ярко-синий цвет в векторе (r, g, b) может быть определен как $(0, 0, 255)$, ярко-красный как $(255, 0, 0)$, ярко-фиолетовый — $(255, 0, 255)$, черный — $(0, 0, 0)$, белый — $(255, 255, 255)$ и т.д.

Выделим в видеопотоке два смежных (соседних) цветных кадра 1 и 2 и применим к ним параболическое преобразование [3, 4]. Как известно, для черно-белых изображений оно начинается с бинаризации двух избранных кадров. После разложения цветных кадров на три составляющие каждый результатом бинаризации являются уже шесть новых изображений, созданных из пикселей шести яркостей — максимальной и минимальной для каждого из трех цветов.

$$r'_{xy} = 255 \left| \begin{array}{l} r_{xy} \geq r_b \\ r_{xy} < r_b \end{array} \right. ; \quad r'_{xy} = 0 \left| \begin{array}{l} r_{xy} \geq r_b \\ r_{xy} < r_b \end{array} \right. , \quad (2)$$

$$g'_{xy} = 255 \left| \begin{array}{l} g_{xy} \geq g_b \\ g_{xy} < g_b \end{array} \right. ; \quad g'_{xy} = 0 \left| \begin{array}{l} g_{xy} \geq g_b \\ g_{xy} < g_b \end{array} \right. , \quad (3)$$

$$b'_{xy} = 255 \left| \begin{array}{l} b_{xy} \geq b_b \\ b_{xy} < b_b \end{array} \right. ; \quad b'_{xy} = 0 \left| \begin{array}{l} b_{xy} \geq b_b \\ b_{xy} < b_b \end{array} \right. , \quad (4)$$

где x, y — координаты пикселей двумерного начального и бинаризованных изображений;

r_{xy}, g_{xy}, b_{xy} — цветовые яркости соответствующих пикселей начального изображения до бинаризации;

$r'_{xy}, g'_{xy}, b'_{xy}$ — цветовые яркости этих же пикселей после бинаризации;

r_b, g_b, b_b — пороги бинаризации для отдельных цветовых составляющих.

Наличие для каждого элементарного цвета двух кадров, отличающихся временем съемки, позволяет рассматривать видеопоток как трехмерное изображение, в котором, кроме традиционных для двумерных изображений координат, появляется третья координата — время. Рассмотрим общее параболическое уравнение следующего вида:

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

и попытаемся интерпретировать его для цветного видеопотока.

В этом уравнении D_{xy} — некоторый коэффициент, который имеет конкретное значение для каждого конкретного xy -го пикселя. Подставляя (1) в (5), получим для цветного видеопотока

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial \tau} &= 0,299 \frac{\partial r}{\partial \tau} + 0,587 \frac{\partial g}{\partial \tau} + 0,114 \frac{\partial b}{\partial \tau} = \\ &= 0,299 D_{xyr} \left(\frac{\partial^2 r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 r}{\partial y^2} \right) + 0,587 D_{xyg} \left(\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} \right) + 0,114 D_{xyb} \left(\frac{\partial^2 b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial y^2} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где $D_{xyr}, D_{xyg}, D_{xyb}$ — коэффициенты, имеющие конкретные значения для цветовых составляющих пикселя.

Пусть x, y и τ интерпретируются теперь как дискретные пространственно-временные координаты некоторого xy -го пикселя отдельного двумерного кадра видеопотока с цветовыми яркостями r_{xy}, g_{xy}, b_{xy} . Введем дискретные координаты:

$$\begin{aligned} x &\Leftrightarrow i, & i &= 0, 1, 2, \dots, I \text{ с шагом в 1 пиксель;} \\ y &\Leftrightarrow j, & j &= 0, 1, 2, \dots, J \text{ с шагом в 1 пиксель;} \\ \tau &\Leftrightarrow k, & k &= 0, 1, 2, \dots, K \text{ с шагом в 1 кадр.} \end{aligned} \quad (7)$$

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

$$\frac{dr_{i,j}}{d\tau} \Leftrightarrow \frac{r_{(k+1),i,j} - r_{k,i,j}}{\Delta k}; \quad (8)$$

$$\frac{dg_{i,j}}{d\tau} \Leftrightarrow \frac{g_{(k+1),i,j} - g_{k,i,j}}{\Delta k}; \quad (9)$$

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

$$\begin{aligned} D_{i,j,r} \left(\frac{\partial^2 r_{i,j}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 r_{i,j}}{\partial y^2} \right) &\Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow D_{i,j,r} \left(\frac{r_{(i+1),j,k} - 2r_{i,j,k} + r_{(i-1),j,k}}{\Delta i^2} + \frac{r_{i,(j+1),k} - 2r_{i,j,k} + r_{i,(j-1),k}}{\Delta j^2} \right); \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} D_{i,j,g} \left(\frac{\partial^2 g_{i,j}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g_{i,j}}{\partial y^2} \right) &\Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow D_{i,j,g} \left(\frac{g_{(i+1),j,k} - 2g_{i,j,k} + g_{(i-1),j,k}}{\Delta i^2} + \frac{g_{i,(j+1),k} - 2g_{i,j,k} + g_{i,(j-1),k}}{\Delta j^2} \right); \end{aligned} \quad (12)$$

$$D_{i,j,b} \left(\frac{\partial^2 b_{i,j}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 b_{i,j}}{\partial y^2} \right) \Leftrightarrow \Leftrightarrow D_{i,j,b} \left(\frac{b_{(i+1),j,k} - 2b_{i,j,k} + b_{(i-1),j,k}}{\Delta i^2} + \frac{b_{i,(j+1),k} - 2b_{i,j,k} + b_{i,(j-1),k}}{\Delta j^2} \right). \quad (13)$$

Примем, что $\Delta_i = \Delta_j = \Delta_k = 1$ для всех пикселей всех цветовых составляющих. Тогда из (11), (12) и (13) получаем следующие уравнения:

$$D_{i,j,r} = \frac{r_{i,j,(k+1)} - r_{i,j,k}}{r_{(i+1),j,k} + r_{(i-1),j,k} + r_{i,(j+1),k} + r_{i,(j-1),k} - 4r_{i,j,k}}. \quad (14)$$

$$D_{i,j,g} = \frac{g_{i,j,(k+1)} - g_{i,j,k}}{g_{(i+1),j,k} + g_{(i-1),j,k} + g_{i,(j+1),k} + g_{i,(j-1),k} - 4g_{i,j,k}}. \quad (15)$$

$$D_{i,j,b} = \frac{b_{i,j,(k+1)} - b_{i,j,k}}{b_{(i+1),j,k} + b_{(i-1),j,k} + b_{i,(j+1),k} + b_{i,(j-1),k} - 4b_{i,j,k}}. \quad (16)$$

Коэффициентов $D_{i,j}$ в каждом из трех пар изображений столько, сколько в нем пикселей, т.е. $I \times J$. Пронормировав их от 0 до 255 с помощью выражений

$$r_{i,j}^p = \text{Int} \left(256 \frac{|D_{i,j,r} - D_{\min r}|}{|D_{\max r} - D_{\min r}|} \right), \quad (17)$$

$$g_{i,j}^p = \text{Int} \left(256 \frac{|D_{i,j,g} - D_{\min g}|}{|D_{\max g} - D_{\min g}|} \right), \quad (18)$$

$$b_{i,j}^p = \text{Int} \left(256 \frac{|D_{i,j,b} - D_{\min b}|}{|D_{\max b} - D_{\min b}|} \right), \quad (19)$$

получим три сеточных поля дискретных яркостей $r_{i,j}^p$, $g_{i,j}^p$ и $b_{i,j}^p$ размерностью $I \times J$ каждое или фактически три новых изображения, которые представляют собой итог параболического преобразования начального фрагмента цветного видеопотока. Верхний индекс p в выражениях (17)...(19) означает, что интенсивность относится уже не к пикселям исходного видеопотока, а к пикселям результата параболического преобразования (РПП).

Ранее доказано, что на границах подвижных участков изображения с постоянной на каждом участке, но разной между участками, яркостью, параболическое преобразование создает белую ($z = 255$) линию толщиной в 1 пиксель на общем черном ($z = 0$) фоне полученного кадра [3, 4]. Наличие РПП предоставляет возможность выполнить его численную оценку, которую в дальнейшем можно использовать для расчетов в АСУ ТП.

Рассмотрим конкретный пример. Температурные поля поверхностей литейной формы, видимые тепловизором под разными углами, естественным образом отличаются от формы к форме. Пусть система управления каждый раз должна принимать решения, являются ли эти флуктуации температурных полей нормой или же они свидетельствуют о нежелательных изменениях в процессе литья, требующие дополнительного вмешательства системы.

Для ответа на этот вопрос использовали числовые значения косвенных характеристик РПП, например, его мощности и дисперсии.

Мощность РПП для каждого из цветов оценивали как отношение количества “белых” ($z^p = 255$) пикселей к их общему количеству

$$P = \frac{z_{255}^p}{IJ} = \frac{z_{255}^p}{z_0^p + z_{255}^p} \left[\frac{1}{\text{пикс}} \right]. \quad (20)$$

Статистическую дисперсию размера “белых” пятен на РПП для каждого из цветов вычисляли как

$$\sigma^2 = \frac{(S_{n1} - \bar{S}_n)^2 + \dots + (S_{nm} - \bar{S}_n)^2}{n}; \quad \bar{S}_n = \frac{S_{n1} + \dots + S_{nm}}{n}, \quad (21)$$

где S_{ni} — площадь i -го пятна; $0 \leq i \leq n$.

Дисперсия σ^2 существует в диапазоне $0 \leq \sigma^2 \leq IJ/4$, поэтому это значение подвергали нормированию к 1.

Наличие перечисленных характеристик видеопотока позволяет рассчитать число, которое использовали в качестве комплексного критерия при адаптации подсистем поддержки принятия решений к состоянию литейной формы. Для этого использовали метрику вида

$$M = \sqrt{(P_{2r} - P_{1r})^2 + (\sigma_{2r}^2 - \sigma_{1r}^2)^2 + (P_{2g} - P_{1g})^2 + (\sigma_{2g}^2 - \sigma_{1g}^2)^2 + (P_{2b} - P_{1b})^2 + (\sigma_{2b}^2 - \sigma_{1b}^2)^2}, \quad (22)$$

где индексы 1 и 2 относятся к сравниваемым видеопотокам.

Информационная технология адаптации системы диагностики к состоянию литейной формы имеет две фазы деятельности: обучение и работа. При этом подвижное цветное изображение от тепловизора рассматривается как отдельный зрительный образ объекта наблюдения, который может находиться в двух состояниях: несущественные и существенные изменения техпроцесса, требующие вмешательства АСУ ТП.

Для определения существенности в каждом конкретном случае используется метрика (22). Численная информация о несущественных изменениях хранится в базе данных системы автоматизированной оценки состояния техпроцесса.

Перечисленные компоненты метрического критерия (22) являются минимальным “набором” информации, которую можно получить в результате цифровой обработки РПП цветного видеопотока от тепловизора. Этот набор может быть значительно расширен, например, за счет автономного анализа отдельных фрагментов РПП, придания этим фрагментам различных весовых характеристик значимости и т.п.

Выводы. Предложено для оценки состояния систем “отливка — форма” на литейном конвейере использовать видеосъемку внешней поверхности форм с помощью тепловизора с последующим параболическим преобразованием полученного при этом полноцветного видеопотока. Испытание подсистемы принятия решений, основанной на таком преобразовании и интеллектуальной обработке получаемой при этом информации, подтвердило технико-экономические преимущества метода.

Литература

1. Инфракрасная термография в энергетике. Т 1. Основы инфракрасной термографии / А.В. Афонин, Р.К. Ньюпорт, В.С. Поляков и др. — СПб: ПЭИПК, 2000. — 240 с.
2. Аксенов, Ю.П. Новые подходы к контролю технического состояния трансформаторов тока типа ТФРМ на рабочем напряжении / Ю.П. Аксенов, А.В. Голубев, В.И. Завидей // Энергетик. — 2004. — № 3. — С. 22 — 28.
3. Абу Айаш, Т.А. Новый метод фрактального сжатия подвижных изображений / Т.А. Абу Айаш, Г.Н. Востров, П.А. Становский // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса. — 2005. — Спецвып. — С. 98 — 101.
4. Востров, Г.Н. Метод фрактального кодирования видеопотоков / Г.Н. Востров, П.А. Становский // Материалы междунар. науч.-техн. конференции “Автоматизация: проблемы, идеи, решения”, Севастополь: СНТУ, 12 — 17 сент. 2006 г. — Севастополь, 2006. — С. 96 — 97.

5. Артюшин, Л.Ф. Баланс цветного изображения // Фотокинетика: Энциклоп. / Гл. ред. Е.А. Иофис. — М.: Сов. Энциклоп. 1981.

References

1. Aphonin, A.V. Inphraskrasnaja termographija v energetike. T 1. Osnovi inphraskrasnoj termographii [Infrared Thermography in Power Engineering. V. 1. Bases of Infrared Thermography] / A.V. Aphonin, R.K. Njuport, V.S. Poljakov. — SPb: PEIPK, 2000. — 240 p.
2. Aksenov, Ju.P. Novie podhodi k kontrolju tehničeskogo sostojanija transphormatorov toka tipa TPRM na rabochem naprjagenii [New Approaches to Control of a Technical State of Current Transformers like TFRM on the Operating Voltage] / Ju.P. Aksenov, A.V. Golubev, V.I. Zavidelj // М.: Energetik. — 2004. — № 3. — P. 22 — 28.
3. Abu Ajash, T.A. Novij metod phraktalnogo sgotija podvignich izobragenij [A New Method of Mobile Images Fractal Compression] / T.A. Abu Ajash, G.N. Vostrov, P.A. Stanovskyi. — Trudi ONPU [Proc. of ONPU]. — 2005. — Special release. — P. 98 — 101.
4. Vostrov, G.N. Metod phraktalnogo kodirovanija videopotokov [The Method of Videostreams Fractal Coding] / G.N. Vostrov, P.A. Stanovskyi // Materiali megdunarodnoj nauchno-techničeskoj konpherentsii “Avtomatizatsija: problemi, idei, reshenija” [Materials of the International Scientific and Technical Conference “Automation: Problems, Ideas, Solutions”], Sevastopol: SNTU, 12 — 17 sept. 2006 g. — Sevastopol, 2006. — P. 96 — 97.
5. Artjushin, L.Ph. Balans tsvetnogo izobragenija [The Color Image Balance] // Photokinotekhnika: Entsiklopedija / Glavnij redaktor E.A. Iophis. — М.: Sov. entsiklop., 1981.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Лысенко Т.В.

Поступила в редакцию 10 сентября 2012 г.