

Ю. А. ИПАТОВ, А. В. КРЕВЕЦКИЙ

АЛГОРИТМ ЛОКАЛИЗАЦИИ ГРАНИЦ ТЕКСТУРНЫХ УЧАСТКОВ ДРЕВЕСИНЫ НА ИХ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Синтезирован алгоритм локализации границ между участками ранней и поздней древесины на их цифровых изображениях, оптимальный по критерию максимального правдоподобия. Представлен программно-аппаратный комплекс, реализующий указанный алгоритм. Приведены характеристики качества принимаемых с помощью него решений.

Ключевые слова: распознавание изображений, обработка образов, обработка сигналов.

Введение. Общая постановка задачи. Проблема разработки автоматизированных систем в области лесной таксации к настоящему времени до конца не решена, и исследования в этом направлении продолжают оставаться актуальными. Так, исследование динамики плодородности почв в лесном хозяйстве основано на обнаружении и измерении параметров границ между участками ранней и поздней древесины на изображениях поперечных срезов древесных стволов [1, 2]. В настоящее время в лесоинженерной практике эти задачи решаются визуально с помощью микроскопа и калибровочных линеек. Необходимость накопления статистических данных, достаточных для обоснования результатов указанных исследований, определяет их массовость. Это обуславливается актуальностью решения проблем обеспечения высокой точности и объективности измерений, сохранения зрения работников, снижения трудоемкости измерений и повышения экономической эффективности исследований.

В настоящей статье предлагается один из путей решения данной проблемы путем автоматизации анализа изображений древесных спилов, сформированных телевизионными датчиками (см. рис. 1, *a* — исходное цифровое изображение). Регистрация таких изображений для последующей автоматизации их обработки может быть осуществлена на базе программно-аппаратного комплекса, включающего сопрягаемые микроскоп, телевизионную передающую камеру и вычислительное устройство. Результатом анализа изображений должны стать геометрические характеристики годовых колец — координаты границ между областями ранней и поздней древесины, ширина этих областей, динамика изменений ширины. Визуально (см. рис. 1, *a*) изображения этих областей отличаются средней яркостью и масштабом клеточной текстуры. Мешающими факторами служат неоднородности в виде смоляных каналов, клеточная структура областей со значительными яркостными перепадами на границах клеток, нерегулярность положения границ между текстурами, аддитивные яркостные шумы и неоднородность освещенности по полю кадра изображения.

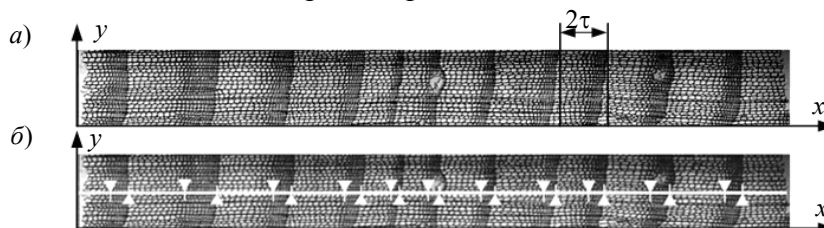


Рис. 1

Таким образом, задача обработки микроскопических изображений поперечных древесных спилов может быть интерпретирована как задача определения положения (локализации)

границ между областями ранней и поздней древесины при действии указанных мешающих факторов.

Статистические характеристики наблюдаемых изображений. Для синтеза алгоритма обнаружения границ областей ранней и поздней древесины необходимо знать статистические и геометрические характеристики изображений указанных областей. Из полученных после обработки оцифрованного черно-белого изображения древесного спила гистограмм яркости следует, что в них нет выраженных мод, соответствующих более ярким областям ранней и темным областям поздней древесины. Таким образом, прямое использование известных методов сегментации разноярких областей [3, 4] для выделения границ не представляется возможным.

Парциальные гистограммы яркости областей, выбранных посредством анализа древесных спилов „вручную“, позволяют сделать вывод о том, что дисперсия яркости вдоль их границ в основном обусловлена клеточной структурой (зернистостью) изображения. Зернистость может быть с высокой доверительной вероятностью аппроксимирована моделью аддитивного шума. Минимальная ширина текстурных полос считается известной и равной τ .

Проверка гипотезы о нормальном законе распределения шума по критерию Пирсона для данного класса изображений не подтвердилась, поэтому для аппроксимации распределений был использован более общий метод кривых Пирсона [5]. Дифференциальное уравнение Пирсона имеет вид

$$\frac{1}{w} \frac{dw}{dz} = \frac{z - M}{b_0 z^2 + b_1 z + b_2},$$

где $w(z)$ — плотность распределения вероятности случайной величины z (далее z — яркость точки изображения), коэффициенты

$$b_0 = \frac{2\mu_2\mu_4 - 3\mu_3^2 - 6\mu_2^3}{2(5\mu_2\mu_4 - 6\mu_3^2 - 9\mu_2^3)}; b_1 = -M = \frac{(\mu_4 + 3\mu_2^2)\mu_3}{2(5\mu_2\mu_4 - 6\mu_3^2 - 9\mu_2^3)}, b_2 = \frac{(4\mu_2\mu_4 - 3\mu_3^2)\mu_2}{2(5\mu_2\mu_4 - 6\mu_3^2 - 9\mu_2^3)}$$

определяются с учетом выборочных значений центральных моментов закона распределения z соответствующих порядков: $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ [6]. В частности, для приведенного на рис. 1, a изображения $\mu_1=0, \mu_2=133, \mu_3=-43, \mu_4=55\ 677$.

Для комплексных корней $z_1 = \alpha + ai, z_2 = \alpha - ai$ уравнения $b_0 z^2 + b_1 z + b_2 = 0$ закон распределения случайной величины z описывается выражением

$$w(z) = w_0 \left(1 + \frac{(z - \alpha)^2}{a^2} \right)^{-m} e^{-v \operatorname{arctg} \frac{z - \alpha}{a}}, \quad (1)$$

где

$$\alpha = \frac{\mu_3(r + 2)}{4\mu_2}; a = \frac{\sqrt{\mu_2}}{4} \sqrt{16(-r - 1) - \beta_1(-r - 2)^2}; m = -\frac{1}{2}(r - 2), v = \frac{\mu_3 r(2 - r)}{4\mu_2 a};$$

$$w_0 = \frac{n}{aF(-r, v)}; r = 2 - \frac{1}{b_0};$$

здесь

$$F(-r, v) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \left(1 + \frac{t^2}{a^2} \right)^{-m} e^{-v \operatorname{arctg} \frac{t}{a}} dt \quad (2)$$

— значение функции Пирсона при заданных параметрах r, v .

Дальнейший анализ полученных аппроксимаций законов распределений яркости для различных участков кадров наблюдаемых изображений позволяет сделать следующие выводы.

Средняя яркость исследуемых текстурных полос ранней и поздней древесины различается. Неравномерность освещенности изображения вдоль границ текстурных полос мала по сравнению с неравномерностью освещенности по площади всего кадра, поэтому каждую из полос можно считать статистически однородной по освещенности. Так как отклонение границ от среднего вектора их наклона более, чем на два порядка меньше их длины, то криволинейностью границ можно пренебречь, и далее они рассматриваются как параллельные.

Интервалы корреляции отсчетов яркости внутри данных областей приблизительно равны шагу дискретизации как вдоль горизонтальной оси, так и вдоль вертикальной, т.е. статистически независимы.

Синтез алгоритма локализации границ текстурных участков. Основываясь на полученных характеристиках изображений, принимаем следующую статистическую модель наблюдения: $\mathbf{z} = \mathbf{s} + \mathbf{n}$, где $\mathbf{z} = \{z_{yx}\}_{x=0, X-1, y=0, Y-1} = \{z_{yx}\}_{YX}$ — матрица элементов (яркостных отсчетов) наблюдаемого изображения; $\mathbf{s} = \{s_{yx}\}_{YX}$ — эталонное изображение; $\mathbf{n} = \{n_{yx}\}_{YX}$ — шумовая составляющая изображения; x, y — пространственные координаты; X, Y — ширина и высота изображения соответственно.

Для ситуации, когда границы между текстурными полосами в кадре изображения ориентированы вертикально, справедливо $s_{yx} = s_x \forall y$. Эталонное изображение \mathbf{s} может быть сформировано однократно для заданного класса изображений путем усреднения яркости кадра по вертикали либо, как будет показано далее, задано упрощенной математической моделью одного минимального периода чередующихся текстурных полос.

С учетом независимости яркостных отсчетов совместная условная плотность распределения вероятности для наблюдаемого изображения имеет вид

$$w(\mathbf{z}|x_0) = \prod_{x=0}^{X-1} \prod_{y=0}^{Y-1} w\{z_{yx}|x_0\} = \prod_{x=0}^{X-1} \prod_{y=0}^{Y-1} w\{z_{yx} - s_{x-x_0}\}, \quad (3)$$

где условная плотность распределения вероятности яркостного отсчета $w\{z_{yx}|x_0\} = w\{z_{yx} - s_{x-x_0}\}$ соответствует распределению Пирсона (1), x_0 — горизонтальное смещение границы раздела двух текстурных участков.

Для зарегистрированного изображения \mathbf{z} условную плотность (3) можно рассматривать как функцию правдоподобия

$$w(\mathbf{z}, x_0) = \prod_{x=0}^{X-1} \prod_{y=0}^{Y-1} \left\{ w_0 \left(1 + \frac{(z_{yx} - \alpha)^2}{a^2} \right)^{-m} e^{-v \arctg \frac{z_{yx} - \alpha}{a}} \Big|_{x_0} \right\} \quad (4)$$

неизвестного параметра x_0 , значение которого и требуется оценить.

Как известно, оптимальным в байесовском смысле является любой алгоритм оценивания, формирующий монотонное преобразование от функции правдоподобия измеряемого параметра с последующим выбором максимума [7].

После подстановки в выражение (4) характерных для данного класса изображений значений коэффициентов, логарифмирования $w(\mathbf{z}, x_0)$, линейных преобразований и отбрасывания малых по абсолютной величине слагаемых получаем приближенное выражение для минимальной достаточной статистики:

$$g_{x_0} = \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} z_{yx} s_{y(x-x_0)} = \sum_{x=0}^{X-1} s_{x-x_0} \sum_{y=0}^{Y-1} z_{yx}. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что оптимальный алгоритм локализации границ между областями ранней и поздней древесины позволяет осуществить усреднение яркостных отсчетов вдоль линии границ, формируя одномерный сигнал g_{x_0} — среднюю яркость по строке (рис. 2), т.е. осуществить согласованную фильтрацию сигнала и затем найти оценку

$$\hat{x}_0 = \arg \max_{x_0} w(z, x_0) \approx \arg \max_{x_0} (g_{x_0}) .$$

Так как максимумов может быть несколько, то их поиск осуществляется по равенству нулю первой производной (первой разности) и отрицательному значению второй производной (второй разности) g_{x_0} .

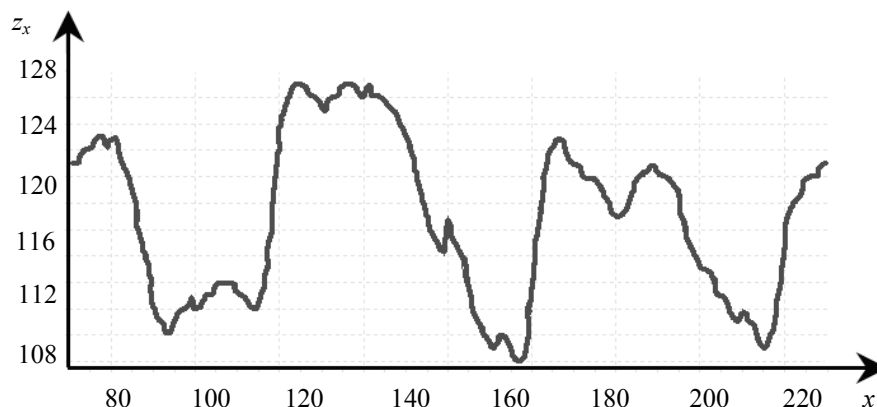


Рис. 2

Аппаратно-программный комплекс для анализа микроскопических изображений древесных спилов. Для автоматизации анализа параметров областей ранней и поздней древесины в процессе исследований был разработан аппаратно-программный комплекс BioImage, реализующий полученный алгоритм. Для исключения ошибок автоматического анализа в комплексе предусмотрена возможность ручной коррекции результатов обнаружения и измерения координат границ рассматриваемых областей. Результаты работы аппаратно-программного комплекса представляются в виде маркеров обнаруженных характерных точек на изображении исследуемого древесного спила (см. рис. 1, б), а также сведений о ширине годовых колец.

Для привязки координат локализации границ к масштабу исследуемого спила в комплексе предусмотрен режим калибровки телевизионной регистрирующей системы.

Для снижения вычислительной сложности в программной реализации рассмотренного алгоритма функция s_x эталонного распределения яркости вдоль строки кадра изображения заменена моделью

$$s_x = \begin{cases} 1 & \text{при } x \in [0; \tau]; \\ -1 & \text{при } x \in]\tau; 2\tau], \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Это позволяет в рамках одного цикла находить как фронт (по максимуму g_{x_0}), так и срез (по минимуму g_{x_0}) текстурного перехода между областями ранней и поздней древесины, а операции произведения при фильтрации по формуле (5) заменить операцией смены знака.

Анализ характеристик алгоритма локализации. Характеристикой качества работы предложенного алгоритма будем считать зависимость средней статистической погрешности Δ_{x_0} определения положения границ от среднего квадратического отклонения σ яркостных шумов изображения.

Дисперсия погрешности определения положения границы x_0 для практически значимого диапазона отношений сигнал/шум $q^2 = \|\mathbf{s}\|^2 \sigma^{-2} \gg 1$ определяется второй производной автокорреляционной функции $d(x_0) = \sum s_x s_{x-x_0}$ в области максимума: $\Delta_{x_0}^2 = -[q^2 d''(\hat{x}_0)]^{-1}$, $\hat{x}_0 = \arg \max d(x_0)$ [7].

Для получения данных характеристик был проведен статистический эксперимент, результаты которого представлены на рис. 3. Из графика видно, что теоретическая (кривая 1) и эмпирическая (кривая 2) погрешности измерения величины x_0 находятся в пределах доверительного интервала (кривые 3) для уровня значимости 0,05.

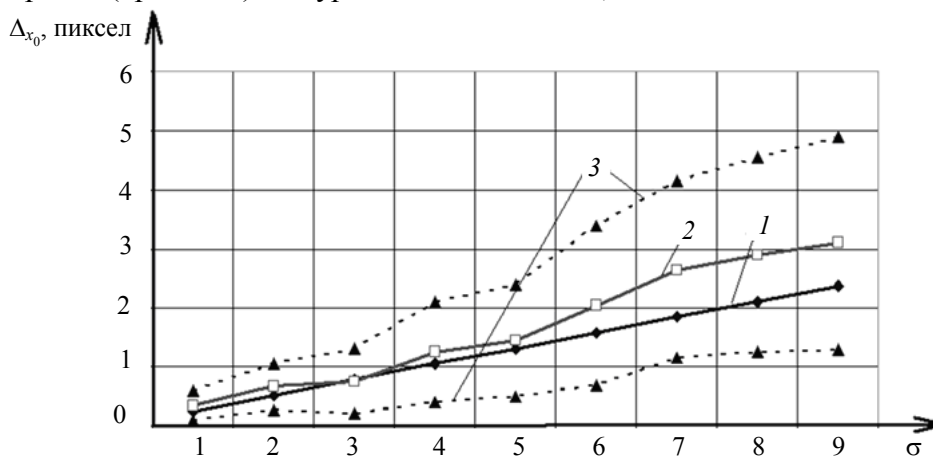


Рис. 3

Заключение. Предложенные алгоритмы и созданный аппаратно-программный комплекс позволяют автоматизировать анализ изображений поперечных древесных спилов с субпиксельной точностью локализации текстурных границ, что в несколько раз выше существующих ручных методов. При этом реализация модифицированного алгоритма, в котором используется упрощенное эталонное изображение, позволяет более, чем в два раза снизить трудоемкость по сравнению с оптимальным алгоритмом при несущественной потере точности.

Время, затрачиваемое на обработку одного телевизионного кадра изображения на ПЭВМ Pentium 4, составляет менее 1 с, что на несколько порядков меньше длительности ручных методов. Для документирования результатов анализа изображений предусматривается функция формирования текстового отчета с сохранением параметров в базе данных.

Аппаратно-программный комплекс, апробированный в Марийском государственном техническом университете (Йошкар-Ола), предложен для использования в лесотехнической отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. Кн. 1, 2.
2. Уголев Б. Н. Древодиноведение с основами лесного товароведения. М.: МГУ леса, 2001. 340 с.
3. Бакут П. А., Колмогоров Г. С., Ворновицкий И. Э. Сегментация изображений. Методы пороговой обработки // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 10. С. 6—24.
4. Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов / Я. А. Фурман, А. В. Кревецкий, А. К. Передреев и др.; Под ред. Я. А. Фурмана. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 592 с.
5. Митропольский А. К. Техника статистических распределений. М.: Наука, 1971.
6. Романовский В. И. Математическая статистика. Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1961.
7. Казаринов Ю. М. Радиотехнические системы. М.: Высш. школа, 1990. 496 с.

Юрий Аркадьевич Ипатов

Сведения об авторах

— ассистент; Марийский государственный технический университет, кафедра информатики, Йошкар-Ола; E-mail: ipatov_ya@list.ru

Александр Владимирович Кревецкий

— канд. техн. наук, доцент; Марийский государственный технический университет, кафедра информатики, Йошкар-Ола; E-mail: krevetsk@mail.ru

Рекомендована кафедрой информатики

Поступила в редакцию 01.04.08 г.