

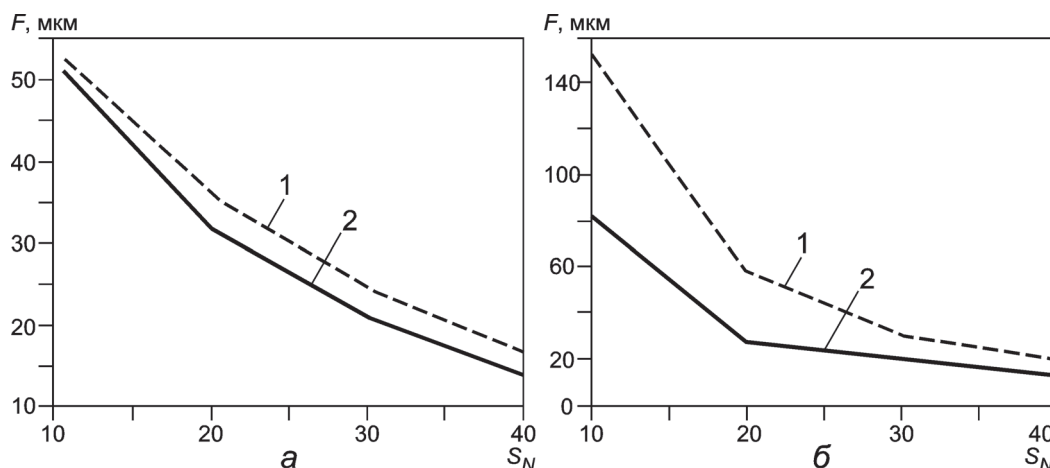


Рис. 2. Погрешности измерений поверхности корыта (а) и спинки (б) пера лопатки: линии 1, 2 соответствуют равномерному распределению и по предложенной методике; S_N — количество измеряемых точек

Литература

1. ГОСТ Р 8.563—2009. ГСИ. Методики (методы) измерений.
2. Li Y., Gu P. Freeform surface inspection techniques — state of the art review // Computer Aided Design. 2004. N. 36(13). P. 1395—1417.
3. Pakh H. Je. a. Integrated precision inspection system for manufacturing of moulds having CAD defined features // Int. J. Adv. Manuf. Technology. 1995. N. 10. P. 198—207.
4. Ainsworth I., Ristic M., Brujic D. CAD-based measurement path planning for freeform shapes using contact probes // Int. J. Adv. Manuf. Technology. 2000. N. 16. P. 23—31.

5. Obeidat S. M., Raman S. An intelligent sampling method for inspecting freeform surfaces // Int. J. Adv. Manuf. Technology. 2009. N. 40. P. 1125—1136.
6. Rajamohan G., Shungam M. S., Samuel G. L. Practical measurement strategies for verification of freeform surfaces using coordinate measuring machines // Metrology and Measurement Systems. 2011. N. 2. P. 209—222.
7. Бородачев Н. А. и др. Точность производства в машиностроении и приборостроении. М.: Машиностроение, 1973.
8. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). СПб: Питер, 2004.
9. Gill P., Murray W., Wright M. Practical optimization. San Francisco: Academic Press, 1981.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Пер. с англ. под ред. И. Г. Арамановича. М.: Изд-во «Наука», 1970.
11. Powell M. J. D. A fast algorithm for nonlinearly constrained optimization calculations, numerical analysis // Lecture Notes in Mathematics [Электрон. ресурс] www.springer.com (дата обращения 01.03.2014 г.).
12. Menq C. H., Yau H. T., Lai G. Y. Automated precision measurement of surface profile in CAD-directed inspection // IEEE Trans. Robotics Automation. 1992. N. 8(2). P. 268—78.

Дата принятия 26.11.2014 г.

004.932.2

Метод оценки составляющих погрешности измерения линейных размеров объектов в автоматизированных системах компьютерной микроскопии

А. Н. ПРОНИЧЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия, e-mail.ru: apronichev@bk.ru

Предложен метод оценки составляющих погрешности измерений линейных размеров объектов в автоматизированных системах компьютерной микроскопии с применением объект-микрометра и автоматизированной обработки изображений.

Ключевые слова: компьютерная микроскопия, обработка изображений.

A method for estimating the components of linear dimensions of object measurement error in automated systems of computer microscopy using the object-micrometer and automated image processing has been suggested.

Key words: computer microscopy, image processing.

В настоящее время широкое применение при измерениях характеристик объектов в материаловедении, биологии и медицине находят автоматизированные системы ком-

пьютерной микроскопии (АСКМ) [1—3]. Автоматизированное распознавание объектов в информационно-измерительной системе строится на измерении ряда их признаков [4, 5],

которые рассчитывают на основе измерений линейных размеров объектов или расстояний между ними [3]. Особую сложность при этом представляет распознавание объектов, образующих близкие кластеры в пространстве признаков. В этом случае актуальной становится оценка погрешностей измерений и определение внешних и внутренних факторов, влияющих на их значения. В случае высокоточных измерений проблемой является оценка составляющих этих погрешностей в АСКМ при различных кратностях увеличения объектов микроскопа [1].

Цель настоящей работы — разработка метода оценки составляющих погрешности измерения линейных размеров в АСКМ на примере информационно-измерительной системы многоцелевого назначения «Атлант», разработанной в НИЯУ «МИФИ» [3]. Структурная схема системы «Атлант» представлена на рисунке.

Изображение образца в системе компьютерной микроскопии представлено в цифровом виде. Расстояние между любыми точками на изображении может быть выражено в пикселах. Как правило, форма пиксела представляет квадрат, а расстояние между произвольными (опорными) точками изображения, выраженное в пикселах, — это количество прямолинейных отрезков длиной, равной стороне пиксела, укладываемых на прямой линии между этими точками. Для приведения размера объекта в пикселах к единицам длины в СИ необходимо найти длину h стороны пиксела в микрометрах. Искомое значение определится выражением

$$L_m = L_n h,$$

где L_m — размер объекта в микрометрах, L_n — расстояние в пикселах между двумя опорными точками на изображении объекта.

При этом относительную погрешность δL_m измерения размера объекта в микрометрах можно оценить по формуле

$$\delta L_m = \delta L_n + \delta h,$$

где $\delta L_n = \Delta L_n / L_n$ — относительная погрешность измерения L_n в пикселах; ΔL_m — абсолютная погрешность измерения L_n в пикселах; δh — относительная погрешность измерения h . Значение ΔL_n зависит от объекта и метода обработки цифровых данных, используемого для определения опорных точек на изображении, между которыми вычисляется L_n . Для измерения h необходимо использовать цифровое изобра-

жение объекта, где нужно указать опорные точки, абсолютное расстояние в микрометрах между которыми известно с заданной погрешностью. Тогда

$$h = L_{эм} / L_{эп};$$

$$\delta h = \delta L_{эм} + \delta L_{эп},$$

где $L_{эм}$, $L_{эп}$ — эталонный размер в микрометрах и пикселах, соответственно; $\delta L_{эм}$ — нормированная относительная погрешность эталонного размера в микрометрах; $\delta L_{эп}$ — действительная относительная погрешность измерения эталонного размера на цифровом изображении в пикселах.

Таким образом,

$$\delta L_m = \delta L_n + \delta L_{эм} + \delta L_{эп}. \quad (1)$$

Рассмотрим на примере вклад указанных составляющих погрешности в итоговую погрешность.

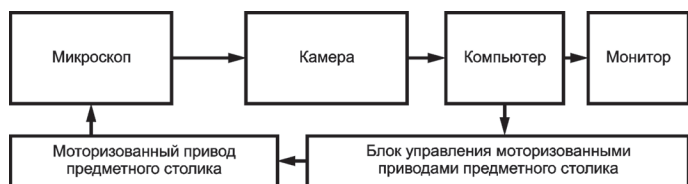
В качестве объекта для измерения h можно использовать объект-микрометр по стандарту [6], в котором нормированы погрешности расположения штрихов. В качестве опорных точек будем использовать центры штрихов объект-микрометра. Расстояние между ближайшими маленькими штрихами равно (10 ± 1) мкм, т. е. $\delta L_{эм} = 10\%$. Расстояние между ближайшими большими штрихами (100 ± 2) мкм, т. е. $\delta L_{эп} = 2\%$. Если принять модель измерения, в которой погрешность определения опорных точек на цифровом изображении составляет 0,5 пиксела независимо от применяемых объективов, то ΔL_n не будет превышать одного пиксела, а δL_n будет обратно пропорциональна L_n .

Например, в системе «Атлант» для $100\times$ объектива в качестве эталонного расстояния можно принять расстояние между маленькими штрихами, так как поле зрения камеры в этом случае не превышает 70 мкм, что меньше расстояния между ближайшими большими штрихами. Тогда в рассматриваемой модели измерения объект размером 10 мкм на цифровом изображении будет составлять около 100 пикселей, $\delta L_n = 1\%$, $\delta L_{эп} = 1\%$, $\delta L_{эм} = 10\%$, а δL_m согласно (1) составит 12%, при этом основной вклад в δL_m будет вносить погрешность $\delta L_{эм}$ объект-микрометра.

При использовании объектива $10\times$ объект размером 10 мкм на цифровом изображении будет составлять 10 пикселей. При расстоянии 100 мкм между соседними большими штрихами объект-микрометра, занимающем на цифровом изображении примерно 100 пикселей, $\delta L_n = 10\%$, $\delta L_{эп} = 1\%$, $\delta L_{эм} = 2\%$, а $\delta L_m = 13\%$. Здесь основной вклад в δL_m вносит δL_n .

Следует отметить, что в рассматриваемой модели точность измерения объекта размером 10 мкм практически не изменяется при переходе от $10\times$ объектива к $100\times$ — увеличение изображения в 10 раз обеспечивает уменьшение относительной погрешности всего на 1%.

При использовании $50\times$ объектива объект размером 10 мкм на цифровом изображении будет составлять около 50 пикселей. При расчете по эталонному расстоянию 100 мкм между



Структурная схема системы «Атлант»

большими штрихами объект-микрометра, которому соответствует 500 пикселей, относительные погрешности составят: $\delta L_{\text{п}} = 2\%$, $\delta L_{\text{эп}} = 0,2\%$, $\delta L_{\text{эм}} = 2\%$, $\delta L_{\text{м}} = 4,2\%$. При этом основной вклад в $\delta L_{\text{м}}$ вносят в равной мере $\delta L_{\text{эм}}$ и $\delta L_{\text{п}}$.

Таким образом, наиболее точное измерение объекта размером 10 мкм в рассмотренном примере может быть выполнено с помощью $50\times$ объектива.

Для того, чтобы уменьшить погрешность измерения при применении объектива с $100\times$ увеличением для определения размера пиксела в микрометрах необходимо использовать эталонный размер с меньшей нормированной погрешностью, чем в рассмотренном выше примере. При использовании объект-микрометра по [6] в качестве эталонного размера можно взять расстояние 60 мкм между крайними штрихами, видимыми в поле зрения системы «Атлант». Поскольку для указанного объект-микрометра погрешность установленного расстояния между соседними штрихами нормирована для 10 мкм, то оценить погрешность эталонного расстояния 60 мкм можно на основании погрешности суммы эталонных размеров. Полагая, что погрешность установленного размера между соседними штрихами случайная величина, распределенная в диапазоне $-1\dots+1$ мкм, и, учитывая, что дисперсия суммы случайных величин равна сумме дисперсий этих величин, получаем, что абсолютная погрешность установленного эталонного расстояния 60 мкм находится в диапазоне $-2,5\dots+2,5$ мкм, следовательно $\delta L_{\text{эм}} = 4\%$, при этом $\delta L_{\text{эп}} = 0,2\%$. В рамках рассматриваемой модели измерений $\delta L_{\text{п}} = 1\%$ для объекта размером 10 мкм, а $\delta L_{\text{м}}$, рассчитанная по (1), составит 5,2 %.

Точность измерений в микрометрах для рассмотренных объектов оказывается ниже, чем при измерениях с применением объектива меньшей кратности ($50\times$). Ситуация может быть исправлена, если использовать эталонный размер 60 мкм с погрешностью, меньше полученной в приведенном выше примере ($\delta L_{\text{эм}} < 3\%$).

Следует заметить, что в принятой выше модели размер пиксела в микрометрах предполагали постоянным для всех точек изображения, что в реальной системе может не выполняться, и этот фактор будет определять дополнительную погрешность при измерении линейных размеров объекта в системе компьютерной микроскопии.

Заключение. Для выполнения измерений с максимальной точностью необходимо оценивать все влияющие на нее факторы, в том числе выбирать объектив с соответствующей кратностью увеличения с учетом вносимых им оптических искажений, а так же в зависимости от размера объекта и нормированных погрешностей используемых эталонных размеров, применяемых для калибровки системы компь-

ютерной микроскопии. При этом следует принимать во внимание, что в условиях выполненной калибровки максимальная точность измерения микроскопических объектов не всегда может быть достигнута при использовании объективов с максимальной кратностью увеличения.

Работа выполнена при поддержке РФ (проект № 14-15—01120).

Л и т е р а т у р а

1. **Пантелеев В. Г., Егорова О. В., Клыкова Е. И.** Компьютерная микроскопия. М.: Техносфера, 2005.
2. **Пантелеев В. Г., Слаев В. А., Чуновкина А. Г.** Метрологическое обеспечение анализаторов изображений // Измерительная техника. 2008. № 1. С. 67—71; **Panteleev V. G., Slaev V. A., Chunovkina A. G.** Metrological provision for image analyzers // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N. 1. P. 107—112.
3. **Михайлов В. Н., Никитаев В. Г., Проничев А. Н.** Метрологические проблемы измерения линейных размеров микроскопических объектов // Инженерная физика. 1999. 1. № 1. С. 65—68.
4. **В. Г. Никитаев, Ю. Р. Нагуманова, А. Н. Проничев, К. С. Чистов.** Особенности проектирования систем распознавания образов для диагностики острых лейкозов с применением методов компьютерной микроскопии // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 65—68; **Nikitaev V. G., Nagumanova Yu. R., Pronichev A. N., Chistov K. S.** Characteristics of the design of systems for the recognition of shapes for the diagnostics of acute leukoses using methods of computer microscopy // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N. 5. P. 583—588.
5. **Никитаев В. Г., Нагорнов О. В., Проничев А. Н., Поляков Е. В., Сельчук В. Ю., Чистов К. С., Блиндарь В. Н., Дмитриева В. В., Гордеев В. В.** Модель описания лейкоцитов периферической крови на основе оптических особенностей структуры ядер // Измерительная техника. 2014. № 5. С. 56—58; **Nikitaev V. G., Nagornov O. V., Pronichev A. N., Polyakov E. V., Sel'chuk V. Yu., Chistov K. S., Blindar' V. N., Dmitrieva V. V., Gordeev V. V.** Model of Description of Leukocytes of Peripheral Blood Based on the Optical Features of the Structure of Nuclei // Measurement Techniques. 2014. V. 57. N. 5. P. 560—563.
6. **ГОСТ 7513—75.** Объект-микрометр. Технические условия.

Дата принятия 24.11.2014 г.