

## БЫСТРЫЙ АЛГОРИТМ СОВМЕЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ

Бессмельцев В.П., Булушев Е.Д.

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН

### Аннотация

Исследована возможность оперативного контроля качества лазерной микрообработки поверхности по данным оптических измерений. Основной задачей является сопоставление CAD-модели и 3D-геометрии обработанной поверхности. Установлено, что стандартные алгоритмы сопоставления либо имеют низкое быстродействие, либо неэффективны при высоком уровне шума и наличии геометрических искажений. Разработан алгоритм сопоставления на основе алгоритма Ciratefi, который ранее не использовался для совмещения изображений высокого разрешения. Быстродействие алгоритма повышено при помощи итеративного поиска оптимума по пирамиде изображений. Тестирование алгоритма на картах высот объектов, полученных лазерными методами обработки, показало его высокую точность и быстродействие.

**Ключевые слова:** лазерная микрообработка, оптическая профилометрия, автоматический контроль качества, совмещение изображений.

### Введение

Одним из современных методов получения трёхмерных изделий с микронным разрешением является лазерное микрофрезерование. При этом обработка материала осуществляется послойно сфокусированным лазерным пучком по данным CAD-CAM проектирования. Типичные структуры формируются в объёме вещества  $\sim 10 \times 10 \times 1$  мм<sup>3</sup> с разрешением 1–10 мкм, при этом обработанная поверхность может иметь большой угол наклона стенок к оси Z и высокую шероховатость ( $> 1$  мкм).

Для получения структур с высокими качественными характеристиками необходимо обеспечить контроль качества обработки [1–4]. Процесс контроля качества состоит из трёх этапов: измерения и восстановления 3D-геометрии, совмещения (сопоставления) CAD-модели и восстановленной 3D-геометрии, извлечения качественных характеристик и сравнения геометрических параметров [5]. Требуемая точность и быстродействие измерений объектов на площади  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup> соответственно 1 мкм и 1 мин. В настоящее время такие характеристики обеспечивают только оптические методы измерений.

Целью работы является создание программно-алгоритмических средств контроля качества лазерной микрообработки. Для этого необходимо разработать алгоритм совмещения карт высот CAD-модели и обработанной поверхности. Картами высот мы называем 16-битные изображения в градациях серого, в которых яркость определяет глубину снятия материала лазером. Карты высот содержат несколько млн. точек и имеют субмикронное разрешение. Необходимо обеспечить совмещение таких карт высот с точностью 1 пиксель за время 1 мин., что позволит контролировать качество серии тестовых объектов за время, сопоставимое со временем их формирования (меньше одного часа).

### Постановка задачи

Рассмотрим характеристики структур, формируемых при лазерной микрообработке поверхности, и особенности их измерения оптическими методами. В

отличие от механической обработки (фрезерования) глубина снимаемого лазером слоя зависит не только от аксиального перемещения обрабатывающего инструмента относительно заготовки, но и от ряда технологических параметров (длительности импульсов, длины волны, выходной мощности и др.). Поэтому при неточном задании режима обработки толщина снимаемого слоя может изменяться нелинейно от слоя к слою и вследствие этого глубина структурных элементов может отличаться от заданной в CAD-модели. Кроме того, обработанная поверхность может содержать дефекты (грат, облой) – связанные области с площадью более  $10 \times 10$  мкм<sup>2</sup>, средняя глубина которых отличается от глубины соответствующего слоя более чем на 10 мкм. При измерении оптическими методами структур с большими углами наклона стенок к оси Z отражённое и рассеянное излучение не полностью собирается на фотосенсоре из-за ограничения входной апертуры, что приводит к существенному ухудшению соотношения сигнал-шум. К тому же регистрируемый сигнал может выходить из динамического диапазона оптического сенсора, вследствие того что коэффициент отражения материала может изменяться на несколько порядков под воздействием лазерного излучения (например, при обработке прозрачных стекол или гладких металлических поверхностей).

Для совмещения CAD-модели и восстановленной 3D-геометрии можно использовать методы совмещения изображений [6]. При совмещении изображений мы считаем, что известны коэффициенты масштабирования (из настроек оборудования), однако неизвестны смещения по трём осям и поворот в плоскости XY, т.к. не всегда есть возможность расположить образец при измерении так же, как он был расположен при лазерной обработке. При известных латеральных смещениях и повороте в плоскости XY аксиальное смещение проводится так, чтобы совместить соответствующие точки необработанной или наименее обработанной поверхности, что позволяет определить рассогласование по глубине. Таким образом, задача

совмещения имеет три независимых переменных: два параметра смещения и угол поворота. На рис. 1 приведены карты высот тестовой CAD-модели и структуры, сформированной в процессе лазерного микрофрезерования и измеренной на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе.

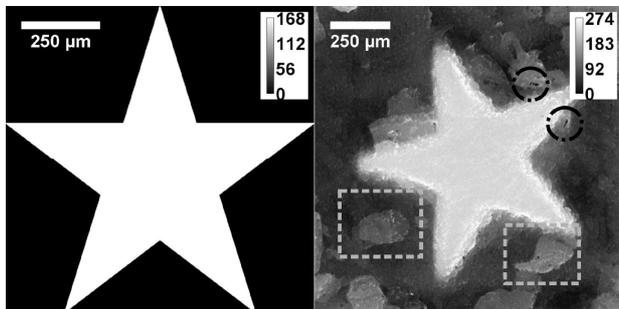


Рис. 1. Слева: карта высот CAD-модели. Справа: карта высот восстановленной 3D-геометрии. Прямоугольниками отмечены дефекты обработки, овалами – зоны с ошибками измерений

Для карт высот  $H_1(x,y)$  и  $H_2(x,y)$  задача совмещения формализуется следующим образом: требуется найти такое пространственное преобразование  $g$  и преобразование яркости  $f$  точек  $(x,y)$ , чтобы:

$$H_1(x,y) = f(H_2(g(x,y))). \tag{1}$$

Вследствие приведённых свойств лазерной микрообработки и метода измерения задача совмещения изображений имеет особенности. Во-первых, изображения отличаются по яркости и контрасту. Во-вторых, на карте высот обработанной поверхности присутствуют искажения – связанные области и контуры, которых нет на карте высот CAD-модели. В-третьих, карта высот обработанной поверхности зашумлена и содержит статистические выбросы, возникновение которых связано с ошибками измерений. Поэтому для карт высот CAD-модели и восстановленной 3D-геометрии равенство (1) выполняется лишь приблизительно.

Для точного совмещения требуется разработать алгоритм устойчивый к указанным особенностям изображений. При этом добавление специальных меток вокруг модели для упрощения оценки параметров рассогласования не всегда возможно, поэтому совмещение необходимо осуществлять посредством поиска соответствия либо между фрагментами, либо между характерными точками изображений.

**Методы совмещения изображений**

Для совмещения CAD-модели и восстановленной 3D-геометрии в задачах контроля качества механической обработки стандартом [7, 8] является итеративный алгоритм ближайших точек ICP (Iterative Closest Point) [9] и его оптимизации [10]. На вход алгоритму подаются два облака точек: CAD-модели и восстановленной 3D-геометрии. На каждой итерации устанавливается соответствие между точками модели и восстановленной 3D-геометрии по критерию ближайшего соседа, вычисляется суммарное расстояние

между двумя облаками точек и параметры преобразования, которые позволяют минимизировать рассогласование, с помощью сингулярного разложения кросс-ковариационной матрицы преобразовывается одно из облаков точек, затем проводится следующая итерация, и так далее, до тех пока изменения между итерациями не станут минимальными. Алгоритм сходится к глобальному экстремуму, если облака точек изначально грубо совмещены.

Простейшим подходом для определения параметров рассогласования являются корреляционные алгоритмы. Для оценки точности совмещения изображений  $I_1$  и  $I_2$  используются различные меры, например, взаимная корреляционная функция:

$$R(x,y) = \sum_{x',y'} I_1(x',y') I_2(x+x',y+y'). \tag{2}$$

При всех возможных сдвигах изображений  $(x,y)$  вычисляется суммарное произведение яркости соответствующих точек  $(x',y')$ . Максимальное значение корреляции соответствует наилучшему совмещению.

Для оценки параметров рассогласования также используются Фурье-методы. Метод фазовой корреляции позволяет определить латеральное смещение. Поворот изображения в плоскости XY и его масштабирование могут быть определены с помощью метода [11] и преобразования Фурье–Меллина.

Существует множество методов, в которых при совмещении используются характерные точки изображений (углы, границы, линии и др.) и дескрипторы изображений, например, моменты изображений. Латеральное смещение может быть определено с использованием моментов нулевого и первого порядка. Угол поворота изображения ( $\alpha$ ) относительно горизонтальной оси можно вычислить по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2m_{11}}{m_{20} - m_{02}}\right) + \frac{\pi}{2}n, \tag{3}$$

где  $n = 1, 2, \dots, m_{pq}$  – центральные моменты порядка  $(p,q)$ , которые для изображения  $I(x,y)$  вычисляются по всем точкам  $(x,y)$  по формуле:

$$m_{pq} = \sum_{x,y} (x - \mu_x)^p (y - \mu_y)^q I(x,y), \tag{4}$$

где  $\mu_x, \mu_y$  – средние значения яркости по осям  $x$  и  $y$ .

В [12] проведено исследование точности совмещения портретных изображений с помощью алгоритма Фурье–Меллина и алгоритма на основе моментов. Параметры рассогласования: смещение  $X$  и  $Y$ , поворот, масштабирование. Установлено, что преобразование Фурье–Меллина позволяет точно вычислять параметры рассогласования и обеспечивает лучшее совмещение, чем метод на основе моментов при небольшом рассогласовании изображений (изменение угла поворота в пределах  $\pm 30^\circ$ , масштаба – в пределах 20 %, смещения – в пределах 10 % от размера исходного изображения). В [13] для определения параметров рассогласования изображений также использовано преобразование

Фурье–Меллина и метод моментов. Показано, что метод моментов имеет высокое быстродействие, но чувствителен к шумам. В [14] для совмещения пространственно сдвинутых изображений с квазирегулярной структурой разработан алгоритм быстрого корреляционного совмещения. В [15] совмещение изображений осуществлялось по линиям, которые предварительно детектируются на изображениях с помощью преобразования Хафа.

Мы протестировали большинство рассмотренных алгоритмов на тестовых объектах (в том числе рис. 1 и рис. 4) и проанализировали точность совмещения. Установлено, что Фурье-методы, основанные на быстром вычислении взаимной корреляционной функции и ICP, неэффективны из-за различия изображений по яркости и контрасту. Методы на основе моментов и предварительного выделения характерных точек также не обеспечивают точного совмещения, т.к. чувствительны к шумам, статистическим выбросам и различным искажениям. Например, метод детектирования ключевых точек SIFT [16] находит особенности на изображениях восстановленной 3D-геометрии в окрестности областей, соответствующих дефектам, и устанавливает ложные соответствия.

Для оценки точности совмещения решено использовать нормализованную взаимную корреляционную функцию, которая для двух векторов  $v$ ,  $w$  представима в следующем виде:

$$R(v, w) = \frac{v'w'}{\|v'\| \|w'\|}, \quad (5)$$

где  $v' = v - \mu_v$ ,  $w' = w - \mu_w$ ;  $\mu_v$  и  $\mu_w$  – соответственно средние значения  $v$  и  $w$ ;  $\|\cdot\|$  –  $L^2$  норма. В нашей задаче использование нормализованной взаимной корреляционной функции делает алгоритм устойчивым к рассогласованию по яркости и контрасту и менее чувствительным к шумам и искажениям из-за использования большого количества статистических данных. При использовании нормализованной взаимной корреляции, на наш взгляд, наиболее подходящими алгоритмами совмещения являются алгоритм полного перебора и алгоритм Ciratefi.

#### Алгоритм полного перебора

В алгоритме полного перебора тестируются все возможные наборы параметров преобразования. Изображение карты высот CAD-модели ( $H_1$ ) скользящим окном перемещается относительно изображения карты высот 3D-геометрии ( $H_2$ ), и в точках  $(x, y)$  вычисляется нормализованная взаимная корреляция ( $R(x, y)$ ) по формуле:

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} (H_1(x', y') - \mu_{H_1}) (H_2(x + x', y + y') - \mu_{H_2})}{\sqrt{\sum_{x', y'} (H_1(x', y') - \mu_{H_1})^2 \sum_{x', y'} (H_2(x + x', y + y') - \mu_{H_2})^2}}, \quad (6)$$

где  $\mu_{H_1}$  и  $\mu_{H_2}$  – соответственно средние значения интенсивностей точек перекрытия CAD-модели и восстановленной 3D-геометрии  $(x', y')$  при совмещении. Функция (6) вычисляется для карт высот, повер-

нутых относительно друг друга на различные углы с заданным угловым шагом  $\delta\alpha$ . После чего определяется максимальное значение  $R_{\max}$ , которое соответствует лучшему совмещению карт высот.

Корректность работы алгоритма проверялась на тестовом объекте (разрешение карты высот больше  $1000 \times 1000$  точек), приведённом на рис. 1, при требованиях на точность совмещения карт высот 1 пиксель. При  $500 \times 500$  возможных смещениях совмещение корректно, однако скорость вычислений низкая (более одного часа на персональном компьютере с Intel Core i5 CPU, 3,2 GHz, 4 GB RAM). Вычисление нормализованной взаимной корреляции может быть оптимизировано за счёт использования преобразования Фурье и разложения функции (6) на сумму функций прямоугольной формы [17] или хранения в таблицах бегущей суммы и суммы квадратов интенсивности точек, по которым производится совмещение двух изображений [18]. Однако ввиду того, что карты высот восстановленной 3D-геометрии содержат статистические выбросы, а при повороте добавляются точки заполнения с нулевой интенсивностью, указанные решения неэффективны.

#### Алгоритм Ciratefi

Алгоритм Ciratefi (Circular, Radial and Template Matching Filter) [19] ранее не использовался для совмещения изображений высокого разрешения, а использовался в оригинальной публикации для совмещения изображения высокого разрешения – сцены с изображением низкого разрешения – шаблоном. Алгоритм не требует выделения характерных точек, инвариантен к смещению, повороту, масштабированию, яркости и контрасту изображений. Алгоритм состоит из трёх этапов: Cifi, Rafi и Tefi. Обозначим точки сцены, с которыми может быть совмещён центр шаблона, множеством  $\{M\}$ . На этапе Cifi центр шаблона и все точки множества  $\{M\}$  по очереди объявляются центрами концентрических колец. Посредством несложных математических вычислений для каждой точки  $\{M\}$  определяется ожидаемый коэффициент масштабирования. Мы пропускаем этот этап, т.к. в нашей задаче масштабные коэффициенты известны из настроек оборудования.

Покажем принцип работы второго и третьего этапов для карт высот, приведённых на рис. 2 и рис. 3. Карта высот CAD-модели является шаблоном, карта высот восстановленной 3D геометрии – сценой. Для наглядности и упрощения объяснения будем считать, что требуемая точность совмещения – 1 пиксель и 15 градусов. На этапе Rafi для центра шаблона строятся радиальные линии с угловым шагом  $\delta\alpha = 15$  градусов, который соответствует требуемой точности совмещения. По тому же принципу для каждой точки множества  $\{M\}$ , выделенного на рис. 3 чёрным квадратом, строится набор радиальных линий. Для каждой радиальной линии вычисляется суммарная яркость. Таким образом, для шаблона получается массив из 24 значений яркости  $v$ , а для каждой точки сцены получается массив  $w(x, y)$ .

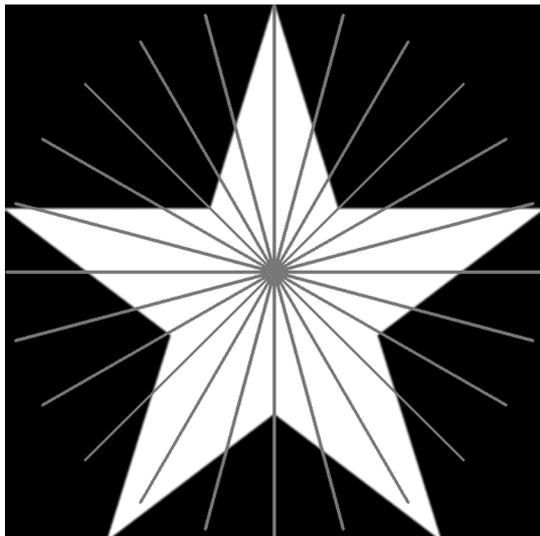


Рис. 2. Карта высот CAD-модели с радиальными линиями

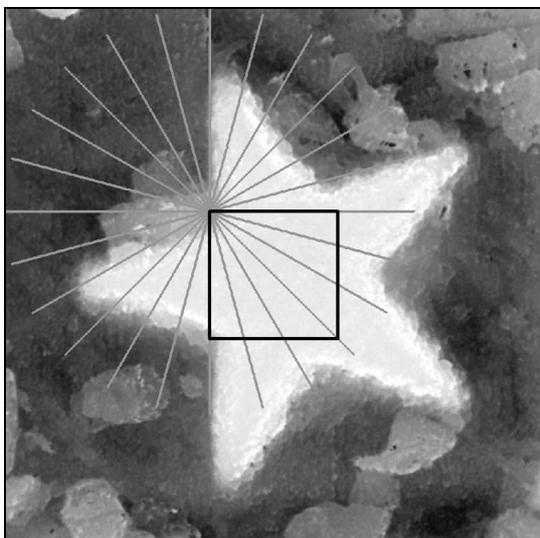


Рис. 3. Карта высот восстановленной 3D-геометрии. Чёрным квадратом выделена зона возможного совмещения с CAD-моделью. Для верхней левой точки визуализированы радиальные линии

При различных относительных циклических сдвигах массивов  $v$  и  $w(x,y)$  по формуле (5) вычисляется нормализованная взаимная корреляция. Относительный угол поворота  $\alpha(x,y)$ , при котором корреляция имеет максимум, является ожидаемым углом поворота шаблона в точке  $(x,y)$ . После этого выполняется этап Tefi: для всех точек  $\{M\}$  вычисляется нормализованная взаимная корреляция по формуле (6), при этом для каждой точки  $(x,y)$  вычисления проводятся только один раз для ожидаемого угла  $\alpha(x,y)$ . После чего для  $\{M\}$  определяется максимум корреляции, положение точки максимума  $(x_m, y_m)$  и, соответственно, смещение шаблона относительно сцены. Угол поворота  $\alpha(x_m, y_m)$  является углом рассогласования изображений.

Особенностью алгоритма является возможность значительного ускорения вычислений посредством фильтрации точек после этапа Rafi (удаления из множества  $\{M\}$ ). Для повышения точности совмещения на этапе Tefi мы вычисляли корреляцию не только

для угла поворота  $\alpha(x,y)$ , но и для двух соседних углов:  $\alpha(x,y) - \delta\alpha$  и  $\alpha(x,y) + \delta\alpha$ . Тестирование алгоритма для различных карт высот показало, что точность совмещения с помощью Ciratefi такая же, как и у алгоритма полного перебора, однако время вычислений на порядок меньше. Тем не менее совмещение осуществляется за несколько десятков минут, что является неприемлемым, поэтому решено оптимизировать алгоритм Ciratefi.

#### Оптимизация Ciratefi

Мы рассмотрели два возможных подхода для улучшения быстродействия алгоритма Ciratefi. Во-первых, ускорение может быть достигнуто за счёт применения сначала грубого поиска по углам (например, с шагом  $\delta\alpha = 15$ ), а затем поиска с высокой дискретизацией по углам ( $\delta\alpha = 1$ ) для точек с максимальным значением нормализованной взаимной корреляции. Во-вторых, можно осуществлять поиск параметров преобразования сначала для изображений низкого разрешения, а затем для изображений высокого разрешения с использованием найденных параметров. Мы реализовали оба подхода и установили, что первый подход не даёт преимуществ, т.к. в алгоритме Ciratefi этап Tefi требует наибольших временных затрат, однако его быстродействие практически не зависит от дискретизации по углам, т.к. угол поворота для каждой точки определяется на этапе Rafi. При этом ускорение на этапе Rafi компенсируется временными затратами на этап оптимизации.

Экспериментальная проверка показала, что быстродействие совмещения повышается при использовании пирамиды изображений. Пирамидой изображений называется такая последовательность изображений, каждое последующее изображение которой получается из предыдущего путём его фильтрации, что позволяет подавить высокочастотные шумы и децимации каждого второго отчёта. Таким образом, пирамида изображений  $L(x,y,i)$  может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} S(x, y, i+1) &= L(x, y, i) * h(x, y), \\ L(x, y, i+1) &= S(2x, 2y, i+1), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $*$  – оператор свёртки,  $i$  – индекс изображения в последовательности,  $L(x,y,0)$  – исходное изображение;  $S(x,y,i)$  – результат свёртки изображения с ядром  $h(x,y)$ . В качестве ядра свёртки использована функция Гаусса; минимальный размер изображения в последовательности –  $128 \times 128$  точек.

Для карт высот CAD-модели и восстановленной 3D-геометрии строится пирамида изображений. Затем, начиная с изображения самого низкого разрешения, осуществляется поиск оптимальных параметров рассогласования по алгоритму Ciratefi. Вокруг оптимума определяется зона интереса (например,  $20 \times 20$  точек), для точек которой проводится поиск параметров на изображениях более высокого разрешения, и так далее. Параметры рассогласования, найденные для изображений исходного разрешения, являются искомыми.

Отметим, что использование пирамиды изображений для ускорения вычислений в задачах обработки и совмещения изображений является известным подходом [20, 21]. Однако он ранее не применялся в комбинации с алгоритмом Ciratefi для быстрого совмещения зашумлённых изображений при наличии искажений.

**Результаты**

Экспериментальные данные

Для формирования тестовых объектов по CAD-модели мы использовали систему лазерной микрообработки на основе принципа составного сканирования [22]. Система включает импульсный волоконный лазер Multiwave, сканирующую головку со сканерами СТ 6420 и телецентрическим объективом, порталный механизм для позиционирования образца и программное обеспечение MarkKey. Тестовая CAD-модель состоит из 25 ступенек, глубина которых последовательно увеличивается по спирали. Размер каждой ступеньки  $100 \times 100 \times 6 \text{ мкм}^3$ . Удаление материала производится послойно так, что центральная ступенька не снимается лазером, ступенька правее центральной снимается на 1-м слое, нижняя правая ступенька – на 24-м слое. Тест-объект сформирован на магниевой подложке и измерен на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе Carl Zeiss LSM 700 с аксиальным шагом между изображениями оптических срезов в 2,2 мкм, 3D-геометрия структуры восстановлена с помощью стандартного метода центра масс [23]. На рис. 4 приведена CAD-модель и восстановленная 3D-геометрия; разрешения соответственно  $1618 \times 1618$  точек и  $2048 \times 2048$  точек.

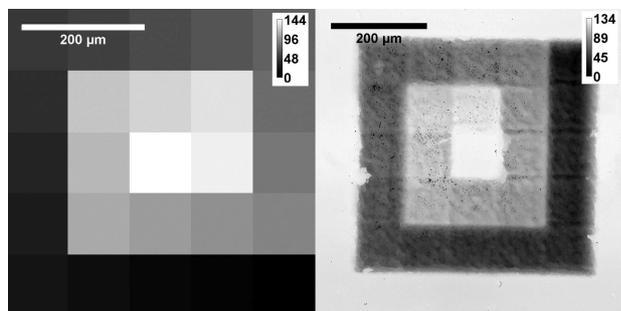


Рис. 4. Слева: карта высот CAD-модели: 25 ступенек, размер ступеньки –  $100 \times 100 \times 6 \text{ мкм}^3$ . Справа: карта высот восстановленной 3D-геометрии, измерения проведены на конфокальном микроскопе

Проведено совмещение с помощью разработанного алгоритма при параметрах: фильтрация оставляет 50 % точек после этапа Rafi, размер зоны поиска сокращается до области  $20 \times 20$  точек вокруг максимума, точность совмещения  $\delta\alpha = 1$  градус и 1 пиксель. В результате работы алгоритма получено, что оптимальными являются следующие параметры преобразования:  $\Delta x = 1060$ ,  $\Delta y = 980$ ,  $\Delta\alpha = 272$  градусов.

Анализ результатов совмещения

На рис. 5 показан результат совмещения карт высот CAD-модели и восстановленной 3D-геометрии; шкала отклонений по глубине приведена в верхнем

правом углу. Положительные и отрицательные значения показывают, насколько меньше и больше удалено материала, чем требовалось.

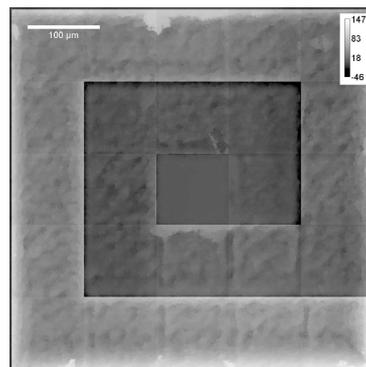


Рис. 5. Совмещение карты высот CAD-модели и восстановленной 3D-геометрии

Анализ результатов совмещения позволяет оператору системы определить наличие отклонений по глубине и размеры зон с дефектами лазерной микрообработки. На рис. 5 видно, что для первых ступенек глубина слоя соответствует заданной в CAD-модели, а начиная с седьмого слоя глубина меньше заданной и растёт нелинейно. Кроме того, видно, что границы между слоями требуют доработки. По результатам совмещения могут быть определены качественные характеристики структуры (например, рис. 6, 7), что показывает высокую практическую ценность разработанного решения.

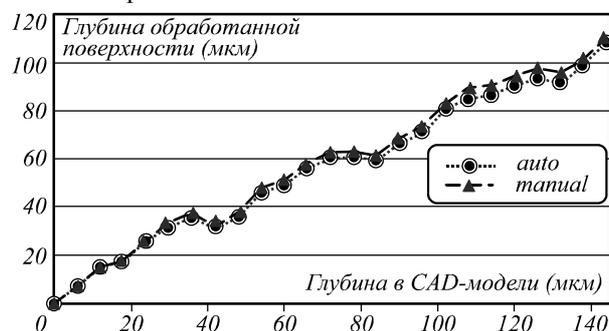


Рис. 6. Зависимость глубины структуры, полученной в результате обработки, от заданной в CAD-модели. Пунктирная линия показывает результаты измерения «вручную» по данным совмещения; точечная линия – автоматическое вычисление. Глубина растёт линейно на первых 7 ступеньках, затем рассогласование увеличивается

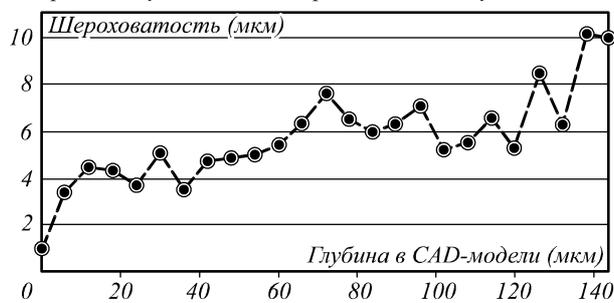


Рис. 7. Средняя шероховатость в зависимости от глубины заданной в CAD-модели

*Сравнение алгоритмов совмещения*

Проведено сравнение разработанного алгоритма, алгоритма Ciratefi и алгоритма полного перебора при совмещении карт высот, приведённых на рис. 4;  $\delta\alpha$  – угловая дискретизация:

- (1) Полный перебор ( $\delta\alpha = 15$  градусов).
- (2) Ciratefi ( $\delta\alpha = 15$  и 1 градус).
- (3) Оптимизированный алгоритм Ciratefi с использованием пирамиды изображений ( $\delta\alpha = 1$  градус).
- (4) Полный перебор с использованием пирамиды изображений ( $\delta\alpha = 15$  градусов).

Размер зоны возможного совмещения –  $430 \times 430$  точек, в (3), (4) размер зоны поиска сокращается до области  $20 \times 20$  точек вокруг максимума найденного на предыдущем этапе. В алгоритмах (2) и (3) после этапа Rafi фильтрация оставляет 50 % точек. Тестирование алгоритмов проведено на персональном компьютере с Intel Core i5 CPU, 3,2 GHz, 4 GB RAM. Результаты приведены в табл. 1, где  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta\alpha$  – искомые параметры рассогласования.

Таблица 1. Сравнение алгоритмов совмещения

Алгоритм	$\delta\alpha$	Результат совмещения $\Delta x$ , $\Delta y$ , $\Delta\alpha$	Время (мин)
Полный перебор	15	1059, 982, 270	>600
Ciratefi	15	1059, 982, 270	20
	1	1060, 980, 272	27
Ciratefi с пирамидой изображений	1	1060, 980, 272	0,5
Полный перебор с пирамидой изображений	15	1059, 982, 270	6

Тестирование показало, что при  $\delta\alpha = 15$  градусов алгоритм Ciratefi обеспечивает ту же точность совмещения, что и алгоритм полного перебора. При этом быстродействие в 30 раз выше. При повышении дискретизации по углу ( $\delta\alpha = 1$  градус) время вычисления Ciratefi увеличивается, но незначительно, тогда как для алгоритмов полного перебора оно бы увеличилось в 15 раз. Разработанный нами алгоритм обеспечивает ту же точность совмещения, что и алгоритм Ciratefi, но быстродействие выше (меньше 1 минуты на совмещение). Для сравнения показано, что пирамидальный поиск также ускоряет полный перебор, однако время вычисления больше, чем у нашего алгоритма даже при невысокой угловой точности совмещения ( $\delta\alpha = 15$  градусов).

**Заключение**

В настоящей работе решена задача сопоставления карт высот САД-модели и поверхности изделия, обработанного лазером, при высоком уровне шумов и искажений последней. Показано, что стандартные алгоритмы на основе моментов изображений, Фурье-преобразования и поиска ключевых точек неэффективны, вследствие наличия дефектов обработки и

ошибок измерения. Алгоритм полного перебора имеет низкое быстродействие. Мы разработали новый алгоритм на основе алгоритма Ciratefi, который ранее не использовался для сопоставления изображений. Его быстродействие повышено за счёт использования пирамиды изображений, т.е. итеративного поиска оптимума от грубого к частному. Алгоритм может также подойти для контроля качества в других задачах микропроизводства и структурирования поверхности, в которых 3D-геометрия восстанавливается по данным оптических измерений.

**Благодарности**

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2012-218-03-004).

**Литература**

1. **Orazi, L.** An automated procedure for material removal rate prediction in laser surface micromanufacturing / L. Orazi, G. Cuccolini, A. Fortunato, G. Tani // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2009. – V. 46(1). – P. 163-171.
2. **Soveja, A.** Optimization of TA6V alloy surface laser texturing using an experimental design approach / A. Soveja, E. Cicala, D. Grevey, J. Jouvard // Optics and Lasers in Engineering. – 2008. – V. 46(9). – P. 671-678.
3. **Desai, C.K.** Prediction of depth of cut for single-pass laser micro-milling process using semi-analytical, ANN and GP approaches / C.K. Desai, A. Shaikh // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2011. – V. 60(9-12). – P. 865-882.
4. **Ciurana, J.** Neural Network Modeling and Particle Swarm Optimization (PSO) of Process Parameters in Pulsed Laser Micromachining of Hardened AISI H13 Steel / J. Ciurana, G. Arias, T. Ozel // Materials and Manufacturing Processes. – 2009. – V. 24(3). – P. 358-368.
5. **Li, Y.** Free-form surface inspection techniques state of the art review / Y. Li, P. Gu // Computer Aided Design. – 2004. – V. 36(13). – P. 1395-1417.
6. **Zitova, B.** Image registration methods: a survey // Image and Vision Computing. – 2003. – V. 21(11). – P. 977-1000.
7. **Prieto, F.** An Automated Inspection System / F. Prieto, T. Redarce, R. Lepage, P. Boulanger // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2002. – V. 19(12). – P. 917-925.
8. **Wolf, K.** An approach to computer-aided quality control based on 3D coordinate metrology / K. Wolf, D. Roller, D. Schäfer // Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – V. 107(1). – P. 96-110.
9. **Besl, P.J.** A method for registration of 3-D shapes / P.J. Besl, N.D. McKay // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence – 1992. – V. 14(2). – P. 239-256.
10. **Rusinkiewicz, S.** Efficient Variants of the ICP Algorithm / S. Rusinkiewicz, M. Levoy // 3-D Digital Imaging and Modeling. – 2001. – P. 145-152.
11. **Castro, E.** Registration of translated and rotated images using finite Fourier transforms / E. Castro, C. Morandi // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1987. – V. 9(5) – P. 700-703.
12. **Мясников, Е.В.** Определение параметров геометрических трансформаций для совмещения портретных изображений // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31, № 3. – С. 77-82.

13. **Чемерис, Д.С.** Исследование методов определения геометрического рассогласования двух изображений для решения задачи оптического наведения и стыковки подводного робота / Д.С. Чемерис, И.Н. Бурдинский // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB: сб. науч. трудов. – СПб., 2011. – С. 465–470.
14. **Чочиа, П.А.** Быстрое корреляционное совмещение квазирегулярных изображений // Информационные процессы. – 2009. – Т. 9. № 3. – С. 117-120.
15. **Волегов, Д.Б.** Предварительное грубое совмещение изображений по найденным на них прямым линиям для построения мозаик, сверхразрешения и восстановления трёхмерных сцен / Д.Б. Волегов, Д.В. Юрин // Программирование. – 2008. – Т. 34, № 5. – С. 47-66.
16. **Lowe, D.G.** Object recognition from local scale-invariant features // Computer Vision. – 1999. – P. 1150-1157.
17. **Briechele, K.** Template matching using fast normalized cross correlation // Aerospace, Defense Sensing, Simulation, and Controls. – 2001. – P. 95-102.
18. **Lewis, J.P.** Fast Normalized Cross-Correlation // Vision Interface. – 1995. – V. 10(1). – P. 120-123.
19. **Araújo, S.A.** Grayscale template-matching invariant to rotation, scale, translation, brightness and contrast / S.A. Araújo, H.Y. Kim // IEEE Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology. – 2007. – V. 4872. – P. 100-113.
20. **Tanimoto, S.L.** Template matching in pyramids // Computer Graphics and Image Processing. – 1981. – V. 16(4). – P. 356-369.
21. **Vanderbrug, G.J.** Two-Stage Template Matching / G.J. Vanderbrug, A. Rosenfeld // Computers, IEEE. Transactions. – 1977. – V. 26(4). – P. 384-393.
22. **Goloshevsky, N.** Precision laser system based on complementary scanning principle for dielectric materials micro-processing / N. Goloshevsky, A. Aleshin, S. Baev, V. Bessmeltsev // Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies SPIE. – Ed. by V.P.Veiko. – СПб., – 2008. – P. 69850M.1-69850M.9.
23. **Fisher, R.** A comparison of algorithms for subpixel peak detection / R.A. Fisher, D.K. Naidu // Image Technology: Advances in Image Processing, Multimedia and Machine Vision. – 1996. – P. 385-404.
6. **Zitova, B.** Image registration methods: a survey // Image and Vision Computing. – 2003. – V. 21(11). – P. 977-1000.
7. **Prieto, F.** An Automated Inspection System / F. Prieto, T. Redarce, R. Lepage, P. Boulanger // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2002. – V. 19(12). – P. 917-925.
8. **Wolf, K.** An approach to computer-aided quality control based on 3D coordinate metrology / K. Wolf, D. Roller, D. Schäfer // Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – V. 107(1). – P. 96-110.
9. **Besl, P.J.** A method for registration of 3-D shapes / P.J. Besl, N.D. McKay // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence – 1992. – V. 14(2). – P. 239-256.
10. **Rusinkiewicz, S.** Efficient Variants of the ICP Algorithm / S. Rusinkiewicz, M. Levoy // 3-D Digital Imaging and Modeling. – 2001. – P. 145-152.
11. **Castro, E.** Registration of translated and rotated images using finite Fourier transforms / E. Castro, C. Morandi // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1987. – V. 9(5) – P. 700-703.
12. **Myasnikov, E.V.** Determination of parameters of geometric transformation to combine portrait images// E.V. Myasnikov // Computer Optics. – 2007. – V. 31(3). – P. 77-82. – (In Russian).
13. **Chemeris, D.S.** Investigation of methods for determining the geometric mismatch of two images for tasks of optical guidance and docking underwater robot / D.S. Chemeris, I.N. Burdinski // Design of engineering and scientific applications in Matlab: Conference proceedings. – Saint-Petersburg, 2011. – P. 465-470. – (In Russian).
14. **Chochia, P.A.** Fast correlation matching of quasi-regular images // Information processes. – 2009. – V. 9(3). – P. 117-120. – (In Russian).
15. **Volegov, D.B.** Preliminary rough image matching based on extracted lines to build mosaic, super-resolution and reconstruction of 3D scenes / D.B. Volegov, D.V. Urin // Programming. – 2008. – V. 34(5). – P. 47-66. – ISSN 0132-3474. – (In Russian).
16. **Lowe, D.G.** Object recognition from local scale-invariant features // Computer Vision. – 1999. – P. 1150-1157.
17. **Briechele, K.** Template matching using fast normalized cross correlation // Aerospace, Defense Sensing, Simulation, and Controls. – 2001. – P. 95-102.
18. **Lewis, J.P.** Fast Normalized Cross-Correlation // Vision Interface. – 1995. – V. 10(1). – P. 120-123.
19. **Araújo, S.A.** Grayscale template-matching invariant to rotation, scale, translation, brightness and contrast / S.A. Araújo, H.Y. Kim // IEEE Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology. – 2007. – V. 4872. – P. 100-113.
20. **Tanimoto, S.L.** Template matching in pyramids // Computer Graphics and Image Processing. – 1981. – V. 16(4). – P. 356-369.
21. **Vanderbrug, G.J.** Two-Stage Template Matching / G.J. Vanderbrug, A. Rosenfeld // Computers, IEEE. Transactions. – 1977. – V. 26(4). – P. 384-393.
22. **Goloshevsky, N.** Precision laser system based on complementary scanning principle for dielectric materials micro-processing / N. Goloshevsky, A. Aleshin, S. Baev, V. Bessmeltsev // Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies SPIE. – Ed. by V.P.Veiko. – Saint-Petersburg, – 2008. – P. 69850M.1-69850M.9.
23. **Fisher, R.** A comparison of algorithms for subpixel peak detection / R.A. Fisher, D.K. Naidu // Image Technology: Advances in Image Processing, Multimedia and Machine Vision. – 1996. – P. 385-404.

### References

1. **Orazi, L.** An automated procedure for material removal rate prediction in laser surface micromanufacturing / L. Orazi, G. Cuccolini, A. Fortunato, G. Tani // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2009. – V. 46(1). – P. 163-171.
2. **Soveja, A.** Optimization of TA6V alloy surface laser texturing using an experimental design approach / A. Soveja, E. Cicala, D. Grevey, J. Jouvard // Optics and Lasers in Engineering. – 2008. – V. 46(9). – P. 671-678.
3. **Desai, C.K.** Prediction of depth of cut for single-pass laser micro-milling process using semi-analytical, ANN and GP approaches / C.K. Desai, A. Shaikh // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2011. – V. 60(9-12). – P. 865-882.
4. **Ciurana, J.** Neural Network Modeling and Particle Swarm Optimization (PSO) of Process Parameters in Pulsed Laser Micromachining of Hardened AISI H13 Steel / J. Ciurana, G. Arias, T. Ozel // Materials and Manufacturing Processes. – 2009. – V. 24(3). – P. 358-368.
5. **Li, Y.** Free-form surface inspection techniques state of the art review / Y. Li, P. Gu // Computer Aided Design. – 2004. – V. 36(13). – P. 1395-1417.

## FAST IMAGE REGISTRATION ALGORITHM FOR AUTOMATED INSPECTION OF LASER MICROMACHINING

V.P. Bessmeltsev, E.D. Bulushev  
Institute of Automation and Electrometry SB RAS

### Abstract

We investigated the possibility of fast quality control of laser micromachining of surface based on optical measurements. The main objective is to match CAD-model and 3D geometry of the machined surface. We found that standard matching algorithms have either low performance or are ineffective at high noise level or at presence of geometrical distortion. The algorithm based on C-rotatefi algorithm, which previously wasn't used for image registration, was developed. The performance of algorithm was increased by using an iterative search of optimum based on image pyramid. The testing of algorithm on height maps of objects formed by laser methods showed its high accuracy and performance.

**Key words:** laser micromachining, optical profilometry, automated inspection, image registration, image matching.

### Сведения об авторах



**Бессмельцев Виктор Павлович**, 1948 года рождения. В 1971 году окончил Новосибирский государственный университет (НГУ) по специальности «Физика». Кандидат технических наук (1985) по направлению «Автоматизация научных исследований и физическая оптика». Заведующий лабораторией лазерной графики в Институте автоматизации и электрометрии СО РАН. В списке научных работ В.П. Бессмельцева 108 публикаций, из них 1 монография, 22 авторских свидетельства и патента. Является ответственным секретарём научного журнала РАН «Автометрия». Область научных интересов: лазерные технологии для устройств ввода-вывода, системы лазерной записи и микрообработки, лазерные сканеры, лазерный 3D-синтез, лазерные интерферометры.

E-mail: [bessmelt@iae.nsk.su](mailto:bessmelt@iae.nsk.su).

**Victor Bessmeltsev** (b. 1948) graduated from the Physical department of Novosibirsk State University (NSU) in 1971. In 1985 he received PhD of Technical Sciences in specialty Automation of Science Investigations and Physical Optics. He is the head of laboratory of Laser Graphics in Institute of Automation and Electrometry SB RAS. He is co-author of 108 publications including 1 monograph and 22 inventions and patents. He is an executive secretary of scientific journal «Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing». His current interests are laser technologies for input-output devices, laser processing and micromachining systems, laser scanners, laser 3D synthesis and laser interferometers.



**Булушев Евгений Дмитриевич**, 1988 года рождения, в 2011 окончил Новосибирский государственный университет, магистр по специальности «Информационные процессы и системы». В настоящее время аспирант Института автоматизации и электрометрии СО РАН. E-mail: [e.d.bulushev@gmail.com](mailto:e.d.bulushev@gmail.com).

**Evgeny Bulushev** (b. 1988) took his master's degree in «Information processes and systems» from Novosibirsk State University in 2011. Currently he is a PhD student in Institute of Automation and Electrometry SB RAS.

Поступила в редакцию 29 сентября 2013 г.