



Литература

1. Мясникова, Н.В. Методы разложения сигналов на основе экстремальной фильтрации / Н. В. Мясникова, М. П. Берестень, Л. А. Долгих // Датчики и системы. – 2011. – № 2. – С. 8–12.
2. Мясникова, Н.В. Время-частотное распределение на основе экстремальной фильтрации в цифровой обработке сигналов/ Н. В. Мясникова, М. П. Берестень // Датчики и системы. – 2013. – № 10. – С. 9–12.
3. Мясникова, Н.В. Разложение на эмпирические моды на основе экстремальной фильтрации/ Н.В. Мясникова, М.П. Берестень// Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 4. – С. 13–17.
4. Ланцош, К. Практические методы прикладного анализа. – М.: Мир, 1996. – 524 с.

В.А. Печенин, Н.В. Рузанов, М.А. Болотов

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАБОТЫ АЛГОРИТМА НАИЛУЧШЕГО СОВМЕЩЕНИЯ ИЗМЕРЕННЫХ И ЭТАЛОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

(Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика
С.П. Королева (национальный исследовательский университет))

В современных производствах детали получают по их САД-моделям. На стадии производственного контроля детали измеряют при помощи 3-х координатной КИМ, контактным или бесконтактным методом. В результате измерения получают облако точек в пространстве, характеризующих поверхности детали. САД-модель характеризует идеальную форму объекта, поверхность которой всегда отлична от измеренной. Для расчета отклонения формы измеренных деталей от их моделей необходимо найти оптимальное Евклидово преобразование координат (перемещение и вращение в пространстве координат измеренных точек) которое совмещает наилучшим образом САД-модель с измеренными данными. Это позволяет определить погрешности изготовления и классифицировать их. Результат любых измерений содержит ошибки (погрешности).

Целью работы является создание метода, повышающего точность оценки отклонения формы изделия за счет повышения точности совмещения измеренных координат и САД-модели изделия при координатном контроле его геометрии.

Стандартным алгоритмом, решающим проблему наилучшего совмещения, является итеративный алгоритм ближайших точек (ICP), предложенный в [1]. Это итерационный алгоритм, у которого на каждой итерации методами нелинейного оптимизационного поиска рассчитываются углы поворота и перемещения вдоль осей. Целевую функцию алгоритма можно представить в виде:

$$f(R, t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \|R \cdot p_i + T - q_i\|^2 \rightarrow 0, \quad (1)$$

где n – количество точек припасовки (измеренных точек);



p_i – координаты i - й измеренной точки;

R – матрица вращения точки;

T – вектор перемещения;

q_i – координаты точки на CAD-модели.

Для поиска параметров функции (1) применяются методы нелинейной оптимизации. Повышение точности совмещения поверхностей является важной задачей в современных координатных измерениях.

Оценку точности работы алгоритма ИСР можно оценить с помощью показателей отклонений матрицы поворота профиля и матрицы транспонирования.

Отклонение матрицы поворота рассчитывается как:

$$e_R = \frac{|R - R'|}{|R|} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где, R – заложенная матрица поворота профиля;

R' – рассчитанная матрица поворота профиля в результате работы алгоритма.

Отклонение матрицы транспонирования рассчитывается по формуле:

$$e_T = \frac{|T - T'|}{|T|} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где, T – заложенная матрица транспонирования профиля;

T' – рассчитанная матрица транспонирования профиля в результате работы алгоритма.

На рисунке 1 представлена CAD-поверхность и измеренная по этой модели поверхность, имеющая производственные погрешности.

Авторами применен метод последовательного квадратического программирования для поиска минимума целевой функции (1). Предлагаемый метод повышения точности содержит шаги:

- 1) определение разностей углов наклона нормалей в соответствующих точках CAD-модели и измеренного профиля уравнения (1);
- 2) поворот координат точек измеренной поверхности на величину средних значений найденных на первом шаге разностей углов наклона;
- 3) расчет матриц R и T с помощью оптимизационного алгоритма.

Шаги 1-3 итерационно повторяются. Пока профиль не совмещен наилучшим образом с номиналом, углы между нормальными в соответствующих точках будут достаточно велики.

В таблицах 1 и 2 рассматривается производительность и точность работы алгоритма ИСР и его работы в сочетании с предложенным методом в двух криволинейных профилях: параболы и сечения спинки пера лопатки компрессора ГТД 9 ступени. Производительность оценивается за счет количества итераций работы алгоритма, точность показана с помощью относительных показателей (2) и (3). В рассматриваемых профилях измеренный профиль повернут относительно номинального профиля на $30'$, и смещен по осям x и y на величины $-0,1$ мм и $0,5$ мм соответственно. При расчетах использовались различные отклонения формы измеренной поверхности как по характеру, так и по абсолютным значениям.

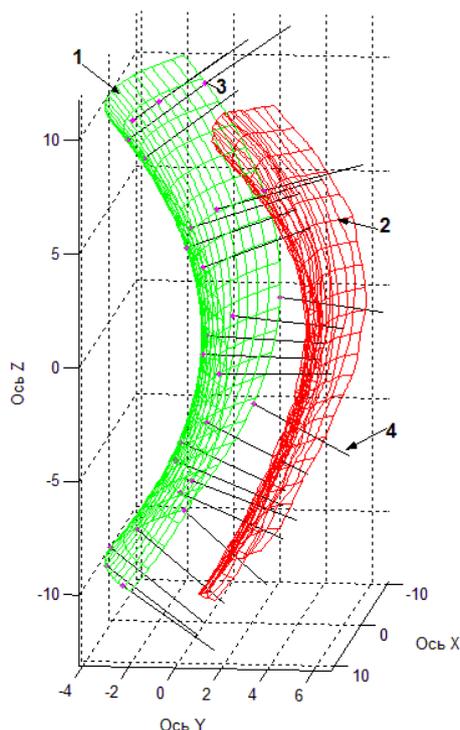


Рис. 1. Графическое представление наилучшего совмещения поверхностей
1 – CAD-модель поверхности, 2 – Измеренная поверхность, 3 – точки для совмещения поверхностей; 4 – нормали CAD-модели

Таблица 1 – Точность работы алгоритма ICP при совмещении рассматриваемых профилей поверхностей

Парабола $y=0,01x^2$, максимальная кривизна 0,02				
Параметр	Без отклонения формы	Систематическое отклонение 40 мкм	Систематическое и случ. отклонение 40 мкм	Не систематическое отклонение, макс. 40 мкм
$e_r, \%$	23,56	25,58	23,63	17,33
$e_t, \%$	21,80	21,77	21,81	22,02
N итераций	4	4	4	4
Спинка пера лопатки компрессора ГТД, максимальная кривизна 0,019				
Параметр	Без отклонения формы	Систематическое отклонение 40 мкм	Систематическое и случ.отклонение 40 мкм	Не систематическое отклонение, макс. 40 мкм
$e_r, \%$	10,55	8,32	9,43	11,21
$e_t, \%$	10,40	10,60	10,50	10,37
N итераций	2	4	4	2



Таблица 2 – Точность работы алгоритма ИСР
в сочетании с предложенным методом

Парабола $y=0,01x^2$, максимальная кривизна 0,02				
Параметр	Без отклонения формы	Систематическое отклонение 40 мкм	Систематическое и случ. отклонение 40 мкм	Не систематическое отклонение, макс. 40 мкм
e_r , %	0,05	0,03	0,15	1,55
e_t , %	0,74	0,75	0,84	0,68
Н итераций	2500	348	125	410
Спинка пера лопатки компрессора ГТД, максимальная кривизна 0,019				
Параметр	Без отклонения формы	Систематическое отклонение 40 мкм	Систематическое и случ.отклонение 40 мкм	Не систематическое отклонение, макс. 40 мкм
e_r , %	3,16	1,21	3,03	5,52
e_t , %	2,51	3,04	2,76	4,02
Н итераций	2	2	2	2

При сравнении таблиц 1 и 2 можно отметить существенное повышение точности, получаемое за счет поворота координат точек оцениваемых профилей перед работой основного алгоритма ИСР. Для параболического профиля точность повысилась на порядка, правда за счет существенного снижения производительности в 100 раз. Для реального профиля спинки пера лопатки погрешность удалось снизить в 2-6 раз с повышением производительности. Таким образом, предложенный метод позволил существенно повысить качество работы алгоритма ИСР и соответственно точность определения производственных погрешностей.

В работе рассмотрен метод повышения точности совмещения измеренных поверхностей с их САД-моделями, необходимые для оценки отклонения формы изготовленных поверхностей. Предложенный метод базируется на геометрических особенностях профиля – углов наклона нормалей. Предложенный метод дополняет широко используемый алгоритм ИСР, повышая его точность при работе со сложными криволинейными поверхностями.

Литература

1. Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) [Текст]/ К. Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560с.
2. P.J. Besl, N.D. McKay, A method for registration of 3-D shapes, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 14, no.2. (1992) 239-256.
3. I. Ainsworth, M. Ristic, D. Brujic, CAD-based measurement path planning for freeform shapes using contact probes, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 16 (2000) 23–31
4. Rajamohan G. Practical measurement strategies for verification of freeform surfaces using coordinate measuring machines [Text]/ G. Rajamohan, M. S. Shunmugam, G. L. Samuel//Metrology and measurement systems. – 2011. - №2. - Pp. 209-222.



5. Gill P., Murray W., Wright M. Practical optimization// San Francisco: Academic Press. 1981.

С.А. Прохоров, А.А. Столбова

ПАТТЕРНЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

(Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет))

Решение задач анализа и синтеза сигналов с заданными характеристиками, идентификация динамических объектов, как правило, осуществляется на основе частотных (спектральных) характеристик.

Для определения частотных характеристик стационарных сигналов, как правило, применяют преобразование Фурье. При анализе частотных характеристик нестационарных сигналов в последнее время применяют вейвлет-преобразование. Преимуществом данного преобразования является возможность определить время существования частоты в сигнале [1].

На кафедре информационных систем и технологий СГАУ была разработана «Автоматизированная система вейвлет-анализа случайных процессов» [3, 5], состоящая из следующих подсистем [4]:

- 1) Подсистема генерации случайного процесса, предназначенная для моделирования исходного случайного процесса с заданным видом корреляционной функции по алгоритмам рекурсивной фильтрации;
- 2) Подсистема генерации модельного сигнала, предназначенная для генерации модельных сигналов заданного вида;
- 3) Подсистема вычисления вейвлет-преобразования, предназначенная для разложения анализируемого процесса на компоненты разного масштаба и дающая информацию о процессе во времени;
- 4) Подсистема вычисления преобразования Фурье, предназначенная для получения преобразования Фурье анализируемого процесса;
- 5) Подсистема вычисления оконного преобразования Фурье, предназначенная для получения оконного преобразования Фурье анализируемого процесса;
- 6) Подсистема построения вейвлетов, предназначенная для расчета значений заданных вейвлетов;
- 7) Подсистема вычисления теоретического вейвлет преобразования, предназначенная для вычисления вейвлет-преобразования модельного сигнала аналитически;
- 8) Подсистема вычисления погрешностей, предназначенная для вычисления абсолютных, относительных и квадратических погрешностей вейвлет-преобразования модельного сигнала;