

7. Филатов Д. О., Круглов А. В. Исследование поверхности твердых тел методом сканирующей туннельной микроскопии (СТМ): Лабораторная работа. Н. Новгород: Нижегородского государственного университета, 2001.

8. Tersoff J., Hamann D. Theory of the scanning tunneling microscope // Phys. Rev. B. 1985. V. 31. P. 805—813.

9. Мандель А. М., Лоскутов А. И., Ошурко В. Б., Соломахо Г. И., Федотова Ю. А. Изучение поверхностных электронных состояний в полупроводниках посредством холодной эмиссии в сканирующих туннельных микроскопах // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 11. С. 23—28.

10. Григорьев С. Н., Мандель А. М., Ошурко В. Б., Соломахо Г. И. Об определении эффективной фрактальной размерности нанопокровов с помощью магнитного поля // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 24. С. 74—80.

11. Мандель А. М., Лоскутов А. И., Ошурко В. Б., Соломахо Г. И. О возможности определения локальной фрактальной размерности поверхности по вольтамперным характеристикам туннельного тока // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. № 2 (298). С. 56—61.

12. Niimi Y., Matsui T., Kambara H., Tagami K., Tsukada M., Fukuyama H. Scanning tunneling microscopy and spectroscopy of the electronic local density of states of graphite surfaces near monoatomic step edges // Phys. Rev. B. 2006. V. 73. P. 085421—085430.

13. Fujita M., Wakabayashi K., Nakada K., Kusakabe K. Peculiar Localized State at Zigzag Graphite Edge // J. Phys. Soc. Jpn. 1996. V. 65. P. 1920—1923.

14. Бычихин С. А., Галямов М. О., Потемкин В. В., Степанов А. В., Яминский И. В. Сканирующий туннельный микроскоп — измерительное средство нанотехники // Измерительная техника. 1998. № 4. С. 58—61.

15. Кузин А. Ю., Тодуа П. А., Панов В. И., Орешкин А. И. Особенности применения упорядоченных пленок молекул фуллеренов для калибровки сканирующих туннельных микроскопов при измерении геометрических параметров объектов // Измерительная техника. 2013. № 2. С. 10—15.

Дата принятия 15.04.2015 г.

621.9.08

Автоматическая коррекция объемных геометрических погрешностей программно-управляемых измерительных и технологических систем

В. И. ТЕЛЕШЕВСКИЙ, В. А. СОКОЛОВ

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия, e-mail: vitel@stankin.ru

Рассмотрен метод лазерной коррекции геометрических погрешностей многокоординатного оборудования с программным управлением с применением калмановской концепции «наблюдения и управления». Для наблюдения за многокоординатной системой предложено использовать многофункциональную лазерную измерительную информационную систему, а для управления точностью — постпроцессор управляющих программ.

Ключевые слова: многокоординатные системы, объемная точность, лазерная коррекция.

The method of laser correction of geometric errors for multicoordinate program controlled equipment with application of Kalman's concept of «Observation and control» is considered. The multicoordinate system observation the use of versatile laser measuring system is proposed, and for accuracy control — the control programs postprocessor.

Key words: multicoordinate systems, volumetric accuracy, laser measurements.

Современное машиностроение характеризуется принципиально новыми тенденциями развития [1—4]. Во-первых, следует отметить интеграцию измерительных и технологических операций в едином технологическом процессе, что существенно повышает производительность и точность обработки изделий. Оснащение технологического оборудования средствами измерений, например измерительными головками, в настоящее время становится «стандартной опцией поставки», предлагаемой производителями. Во-вторых, повышаются требования к точности изготовления и, как следствие, к точности измерений деталей машиностроения. Каж-

дые десять лет допуски на производство деталей ужесточаются на 1—2 квалитета, что соответствует увеличению точности в 1,6—2,5 раза [3, 4]. В-третьих, во многих отраслях машиностроения (аэрокосмической, энергетическом машиностроении, автомобилестроении и др.) шире применяются детали сложных геометрических форм с более высокими эксплуатационными и эргономическими характеристиками, чем детали с простыми поверхностями (плоскими, цилиндрическими, сферическими, коническими и др.). При этом возрастают требования не только к точности позиционирования отдельных рабочих органов технологического и измеритель-

ного оборудования, но и к объемной точности (ОТ) машины в целом — способности точно воспроизводить измерительным наконечником или режущей кромкой инструмента сложные трехмерные поверхности. Количественно ОТ характеризуется объемной погрешностью (ОП) — вектором между номинальным (заданным программно) и действительным положением рабочей точки (измерительного наконечника либо режущей кромки инструмента) в произвольной точке рабочего пространства машины. Впервые понятие ОТ введено в [5], и в последнее десятилетие проблематика ее повышения получила широкое распространение [6–8].

В настоящее время ресурс технологических возможностей повышения ОТ при изготовлении и сборке практически исчерпан, и продвижение в этом направлении (особенно применительно к высокоточным станкам, измерительным системам и КИМ) либо невозможно, либо экономически затратно [9]. Поэтому в метрологии совершенствуется другой метод повышения ОТ, основанный на измерениях геометрических погрешностей станка или КИМ с последующей их автоматической компенсацией [6, 7].

Развитию указанного направления повышения ОТ способствуют, с одной стороны, совершенствование систем программного управления процессами формообразования и измерений, а с другой — существенный прогресс в области измерений геометрических параметров [2]. В настоящее время на смену традиционным методам контроля приходят многофункциональные лазерные информационно-измерительные системы (ЛИИС), которые обеспечивают измерения в широком диапазоне перемещений (до нескольких десятков метров), бесконтактно, с высокой точностью (до 0,001 мкм) на высокой скорости перемещения рабочих органов (до нескольких метров в секунду), что позволяет охватить все типоразмеры и классы точности современного оборудования [2, 10, 11]. Более того, в последнее время появляются ЛИИС, способные за одно движение рабочего органа провести измерение до шести составляющих погрешности, что безусловно, повышает производительность процессов наблюдения [12].

Рассмотренные тенденции открывают принципиально новые возможности для повышения ОТ многокоординатных систем средствами электроники. Суть этих возможностей базируется на калмановской концепции дуальности процессов управления и наблюдения, разрабатываемых в системной динамике сложных управляемых систем [13]. В МГТУ «СТАНКИН» данная концепция, объединяющая процессы наблюдения и управления, впервые развивается применительно к программно-управляемым многокоординатным технологическими и измерительным системам [14–16].

Как было указано в [4, 14, 15], информационный поток в технологическом процессе, с одной стороны, связан с организацией воздействия на технологическую систему, т. е. с процессом управления (control), а с другой стороны, с наблюдением (observation), цель которого — построение модели состояния объекта на основе измерений разнообразных пространственных функций погрешности, перечень которых приведен в [9]. В [6, 9] было показано, что для построения модели состояния в виде карты распределения геометрических погрешностей системы в ее рабочем пространстве (error mapping) необходимо измерить большое число пространственных функций. Так, для трехкоординатной системы это число достигает 21, для пятикоординатной более 30 [6], для систем с большим числом координат оно воз-

растает еще сильнее. Однако в случае высокопроизводительной многофункциональной ЛИИС увеличивающийся объем наблюдений позволяет построить модель состояния за вполне разумное время. В [9] авторы осуществили построение модели состояния многокоординатной системы в виде распределения погрешностей в рабочем пространстве (более 10000 точек) путем измерений 21 пространственной функции погрешности и по разработанному алгоритму визуализировали распределение погрешности в рабочем пространстве за 40–50 с.

Таким образом, появляется возможность увеличить объем наблюдений, получить более полную и информационно насыщенную модель состояния и на ее основе эффективно скорректировать ОП. Более полное знание ОП требует увеличения времени наблюдения. Однако благодаря использованию многофункциональной ЛИИС, результаты которой вводятся в память производственного процесса, модель состояния может служить длительное время при обработке разных деталей. При эксплуатации каждой конкретной технологической системы необходимо установить регламент, по которому эта модель подвергается контролю и корректировке.

Построение модели состояния технологической или измерительной системы активно рассматривается в современной литературе. Для этой цели используются методы Денавита—Хартенберга [17], описания кинематики твердого тела (rigid body kinematics) [18] и множества твердых тел (Multiple-body kinematics) [19], матричной симуляции [20]; анализируются не только систематические, но и случайные характеристики точности оборудования [21].

В качестве объекта наблюдения и управления был выбран вертикально-фрезерный обрабатывающий центр с тремя управляемыми координатами — станок модели VF3 фирмы «HAAS» (США). Компонировка данного станка соответствует рассмотренной в [9] и распространенной как среди измерительных машин, так и среди станков с горизонтальным столом, перемещающимся по осям X, Y, Z.

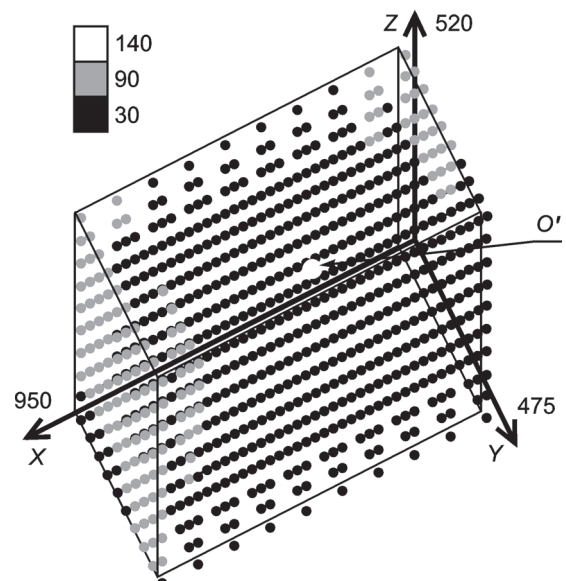


Рис. 1. Распределение объемной погрешности в рабочем пространстве машины после проведения коррекции, размеры выражены в микрометрах. Белая точка O' — оптимальное начало координат пространства

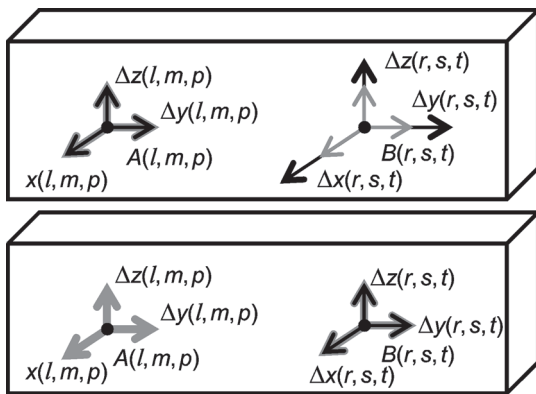


Рис. 2. Иллюстрация метода коррекции погрешностей: черный цвет — векторы погрешностей в соответствующих точках, серый цвет — векторы погрешности в точке A

Основные характеристики станка: перемещения по осям X, Y, Z составляют 1016, 508, 635 мм, соответственно; погрешность позиционирования суппорта ± 50 мкм, повторяемость ± 25 мкм.

Для построения модели состояния в виде карты распределения геометрических погрешностей машин с такой компоновкой авторами использован метод описания кинематики твердого тела [9]. Для определения точностных характеристик станка были выбраны следующие позиции рабочих органов в 10 точках по каждой координатной оси и в диапазонах 50—950 мм с шагом 100 мм (ось X), 25—475 мм с шагом 50 мм (ось Y), 25—520 мм с шагом 55 мм (ось Z).

Измерения проводили по программе, написанной для станка с ЧПУ, обеспечивающей перемещение рабочих органов станка в указанные выше положения и остановку для завершения переходных процессов перед снятием отсчета. Результат построения модели состояния станка — карта погрешностей — представлен на рис. 1.

В современном машиностроении управление технологическим процессом осуществляется в результате взаимодействия CAD/CAM-систем, позволяющих по чертежу и 3D-модели детали сгенерировать управляющую программу, и системы ЧПУ станка, обеспечивающей траекторию относительного перемещения рабочего органа технологического или измерительного оборудования и обрабатываемой (измеряемой) детали по этой программе.

Для управления точностью авторами был выбран метод коррекции погрешностей, основанный на изменениях координат, в которые система приводов машины выводит измерительный наконечник или режущую кромку инструмента. Суть данного метода поясняется на рис. 2.

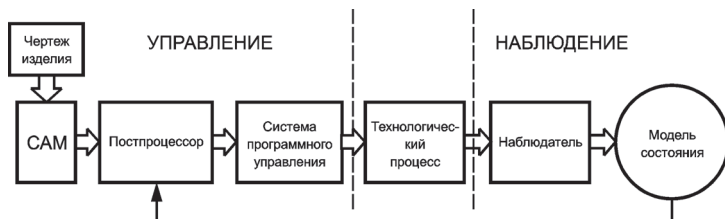


Рис. 3. Схема взаимодействия информационных потоков в технологической системе

Выберем произвольные точки рабочего пространства: точку A с номерами (l, m, p) и точку B с номерами (r, s, t) . Вектор погрешности в точке A определяется значениями $\Delta x_{(l, j, k)}$, $\Delta y_{(l, j, k)}$, $\Delta z_{(l, j, k)}$, а в точке B — значениями $\Delta x_{(r, s, t)}$, $\Delta y_{(r, s, t)}$, $\Delta z_{(r, s, t)}$. Выражения для Δx , Δy , Δz приведены в [9]. Если из значений погрешностей во всех точках вычесть значения погрешности в точке A (например, сместив начало системы координат станка), то значения погрешностей в ней окажутся равными нулю, т. е. $\Delta x_{(l, j, k)} = \Delta y_{(l, j, k)} = \Delta z_{(l, j, k)} = 0$, а погрешности в точке B примут другие значения:

$$\Delta x_{(r, s, t)}^{\text{кор}} = \Delta x_{(r, s, t)} - \Delta x_{(l, j, k)};$$

$$\Delta y_{(r, s, t)}^{\text{кор}} = \Delta y_{(r, s, t)} - \Delta y_{(l, j, k)};$$

$$\Delta z_{(r, s, t)}^{\text{кор}} = \Delta z_{(r, s, t)} - \Delta z_{(l, j, k)}.$$

Таким образом, в точках A, B модули погрешностей

$$\text{будут } \Delta A = 0, \Delta B = \sqrt{(\Delta x_{(r, s, t)}^{\text{кор}})^2 + (\Delta y_{(r, s, t)}^{\text{кор}})^2 + (\Delta z_{(r, s, t)}^{\text{кор}})^2}.$$

Перебрав все заданные точки рабочего пространства и приняв их за нулевые, найдем такую точку F, для которой сумма модулей скорректированных погрешностей минимальна:

$$\sum_i \Delta F_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $i = \overline{1, N}$; N — число измеренных точек в рабочем пространстве.

Эти изменения могут выполняться на разных этапах подготовки производства детали: на этапе разработки управляющей программы в CAM-системе; в системе ЧПУ после загрузки в нее управляющей программы; на промежуточном этапе — после формирования CAM-системой управляющей программы, но до загрузки программы в систему ЧПУ. На практике авторы столкнулись с тем, что во многих случаях доступ к соответствующим функциям систем CAM и ЧПУ ограничен, т. е. закрыт для потребителя и предусмотрен только для сервисных представителей, осуществляющих техническое обслуживание машин. Данное обстоятельство обусловило введение промежуточного этапа для осуществления коррекции погрешностей и изменения управляющей программы. С этой целью авторами был разработан программный комплекс — постпроцессор управляющих программ (рис. 3). Результаты его работы представлены на рис. 1. Аналогично [9] после нахождения оптимального начала координат и коррекции погрешностей во всех точках рабочего пространства малые погрешности (менее 30 мкм) занимают максимальную долю рабочего пространства машины.

Постпроцессор управляющих программ реализует следующую последовательность действий:

1. Загружаются результаты измерений погрешности, полученные с помощью ЛИИС.

2. По формулам, приведенным в [9], вычисляются координатные составляющие вектора ОП во всех исследуемых точках рабочего пространства.

3. Начало системы координат станка сдвигается по соответствующим осям на значения погрешностей, рассчитанные для некоторой k -й точки рабочего пространства. Таким образом, ОП в выбранной точке полностью компенсируется сдвигом начала координат и равняется нулю при выполнении системой ЧПУ подготовленной программы.

4. В остальных точках рабочего пространства координатные составляющие ОП изменяются в соответствии со сдвигом начала координат, что приводит к изменению распределения ОП, т. е. как к ее уменьшению, так и увеличению во всех точках рабочего пространства машины.

5. Шаги 3, 4 повторяются для каждой i -й точки рабочего пространства. В результате находится j -я точка, при внесении коррекции по которой суммарное значение модулей ОП минимально согласно (1) для всех точек рабочего пространства. Условие (1) позволяет получить минимальную погрешность позиционирования в максимальной зоне рабочего пространства.

6. Загружается управляющая программа, сформированная системой САМ.

7. Анализируются кадры программы на языке G-code, и изменяются значения координат в кадрах в соответствии с составляющей вектора погрешности в точке j , найденной на шаге 5.

8. Управляющая программа с измененными кадрами загружается в систему ЧПУ.

Заключение. Предложенный метод коррекции по существу сводится к оптимальному поиску «нулевой точки» рабочего пространства, в которой учитываются объемные геометрические погрешности данной конкретной машины, минимальные в наибольшем объеме рабочего пространства.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (НИР № 1883) на оборудовании Центра коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН» (соглашение № 14.593.21.0004 от 04.12.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI59314X0004).

Л и т е р а т у р а

1. Григорьев С. Н., Мастеренко Д. А., Телешевский В. И., Емельянов П. Н. Современное состояние и перспективы развития метрологического обеспечения машиностроительного производства // Измерительная техника. 2012. № 11. С. 56—59.
2. Телешевский В. И., Гришин С. Г. Измерительная информационная система для нанометрологии // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. № 2. С. 33—40.
3. Телешевский В. И. К проблеме интеллектуализации измерительных процессов в производственных системах // Сборник докладов Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'99), 1999. С. 34—37.
4. Григорьев С. Н., Телешевский В. И. Проблемы измерений в технологических процессах формообразования // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 13—18.
5. McKeown P. A., Loxham J. Some Aspects of The Design of High Precision Measuring Machines // Ann. CIRP. 1973. V. 22. N. 1. P. 139—140.

6. Schwenke H. e. a. Geometric error management and compensation of machines — an update // Ann. CIRP. 2008. V. 57. N. 2. P. 660—675.

7. Schwenke H., Franke M., Hannaford J. Error mapping of CMMs and Machine tools by a single tracking interferometer // Ann. CIRP. 2005. V. 54. N. 1. P. 475—478.

8. Grigoriev S. N., Teleshevsky V. I., Sokolov V. A. Volumetric Geometric Accuracy Improvement for Multi-Axis Systems Based on Laser Software Error Correction // Proc. Int. Conf. Competitive Manufacturing «COMA'13» Stellenbosch (South Africa), 2013. P. 301—306.

9. Телешевский В. И., Соколов В. А. Лазерная коррекция геометрических погрешностей многокоординатных систем с программным управлением // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 33—37.

10. Фирма Renishaw. Системы для проверки точности и калибровки станков и координатно-измерительных машин [Официальный сайт]. <http://renishaw.com> (дата обращения: 21.02.2015 г.).

11. Фирма Hewlett Packard. Системы для проверки точности и калибровки станков и координатно-измерительных машин [Официальный сайт]. <http://hp.com> (дата обращения 21.02.2015 г.).

12. Фирма Automated Precision Inc. (API) Системы для проверки точности и калибровки станков и координатно-измерительных машин [Официальный сайт]. <http://apisensor.com> (дата обращения: 21.02.2015 г.).

13. Воронов А. А. Введение в динамику сложных управляемых систем. М.: Наука, 1985.

14. Телешевский В. И. Принципы построения компьютеризированных систем обеспечения качества // Автоматизация проектирования. 1999. № 1. С. 21—27.

15. Телешевский В. И. Измерительная информатика в машиностроении // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. № 1. С. 33—38.

16. Телешевский В. И. Измерительная информатика в машиностроении (окончание) // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. № 2. С. 41—45.

17. Lamikiz A., López de Lacalle L. N., Ocerin O., Díez D., Maidagan E. The Denavit and Hartenberg approach applied to evaluate the consequences in the tool tip position of geometrical errors in five-axis milling centres // Int. J. Advanced Manufacturing Technol. 2008. V. 37. N. 1—2. P. 122—139.

18. Rahman M., Heikkala J., Lappalainen K. Modeling measurement and error compensation of multi-axis machine tools // Int. J. Machine Tools & Manufacture. 2000. V. 40. N. 10. P. 1535—1546.

19. Okafor A. C., Ertekin Y. M. Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics // Int. J. Machine Tools & Manufacture. 2000. V. 40. N. 8. P. 1199—1213.

20. Lin Y., Shen Y. Modelling of five-axis machine tool metrology models using the matrix summation approach // Int. J. Advanced Manufacturing Technol. 2003. V. 21. N. 4. P. 243—248.

21. Ahn K. Gee., Cho D. W. An analysis of the volumetric error uncertainty of a three axis machine tool by beta distribution // Int. J. Machine Tools & Manufacture. 2000. V. 40. N. 15. P. 2235—2248.

Дата принятия 15.04.2015 г.