

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 681.786.23

ТОЧНОСТЬ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ 3D-МОДЕЛЕЙ ПРИ ЛАЗЕРНОМ СКАНИРОВАНИИ

© 2012 г. В. О. Тишкин*; В. А. Парфенов**, канд. техн. наук

* Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”, Санкт-Петербург

E-mail: tiviol@gmail.com

Проведены эксперименты по лазерному сканированию эталонного (тестового) объекта с последующим созданием его электронной трехмерной модели. Предложена и описана методика исследования точности измерений при трехмерном сканировании.

Ключевые слова: лазерное 3D-сканирование, лазерный сканер, скан, электронная 3D-модель, электронный паспорт памятника, тестовый образец, точность измерений, сохранение культурно-исторического наследия.

Коды OCIS: 230.2090, 100.6890

Поступила в редакцию 12.03.2012

Введение

В настоящее время все более широкое распространение получает технология трехмерного (3D-) лазерного сканирования, позволяющая создавать высокоточные виртуальные копии (электронные 3D-модели), которые несут информацию о размерах и геометрической форме исследуемых объектов. Лазерное сканирование применяется в науке и технике (в проектировании, реконструкции, строительстве, медицине и проч.) [1–3], а в последние годы стало все чаще использоваться при решении различных задач по сохранению объектов культурно-исторического наследия [4–6].

Независимо от конкретного применения на практике очень важно, чтобы создаваемая при лазерном сканировании 3D-модель с высокой степенью точности соответствовала (т. е. адекватно воспроизводила) исходному (сканируемому) объекту. Точность создания 3D-моделей определяется главным образом точностью измерений, которая зависит от технических характеристик самого лазерного сканера и ус-

ловий сканирования. Однако очень важную роль играет также программное обеспечение, используемое при обработке результатов сканирования, и квалификация специалиста, который ее проводит. Отметим, что, несмотря на свою важность, проблема точности создания 3D-моделей при лазерном сканировании в научной литературе почти не рассматривается. Известны работы, в которых анализируется точность лазерных сканеров и факторы, приводящие к погрешности измерений [7, 8], а вот вопросам влияния компьютерной обработки данных сканирования на качество получаемой в итоге 3D-модели в литературе посвящено очень малое число работ (см., в частности, [9]). В данной статье рассмотрена именно эта проблема.

Постановка задачи. Методы исследования

Проблема обеспечения высокой точности 3D-моделей наиболее актуальна при использовании лазерного сканирования в машино-

строении, медицине и создании электронных паспортов скульптурных памятников. В последнем случае это связано с особенностями рельефа поверхности сканируемых объектов. Любая скульптура имеет так называемые “поднутрения” (складки драпировки, отверстия, углубления и др.), куда при сканировании невозможно направить лазерный пучок, соответственно, невозможно получить и отраженный сигнал, несущий информацию об этой части поверхности. С другой стороны, при документировании данных о скульптурных памятниках неточность создания 3D-модели проявляется в потере мелких деталей пластики, а это ведет к искажению их визуального восприятия, что недопустимо при создании физических копий скульптур.

В последние годы с целью сохранения наиболее значимых с исторической и художественной точки зрения экстерьерных памятников во многих странах мира их стали заменять копиями. Одним из наиболее перспективных способов копирования является использование инновационной технологии, основанной на применении в совокупности лазерного сканирования и камнеобрабатывающих фрезерных станков с числовым программным управлением [10, 11]. При таком подходе сначала создается электронная 3D-модель памятника. Затем в виде компьютерного файла эта модель загружается в микропроцессор станка-робота, который “вырезает” копию скульптуры из глыбы камня (мрамора, известняка, гранита и др.) или дерева. Очевидно, что точность соответствия копии оригиналу зависит в первую очередь от точности создания 3D-модели памятника.

На протяжении последних нескольких лет авторы данной статьи занимаются созданием электронных 3D-моделей памятников истории и культуры и их физических копий [12, 13]. Поэтому вопросы точности создания 3D-моделей сканируемых объектов имеют

большое практическое значение, что и явилось побудительным мотивом для проведения исследований в этой области.

В данной работе были проведены эксперименты по лазерному сканированию эталонных (тестовых) объектов с последующим созданием их 3D-моделей. В качестве эталонных объектов были выбраны предметы относительно простой геометрической формы, размеры которых известны (или могут быть измерены) с высокой точностью. Ниже приводится краткое описание использованных в экспериментах лазерных сканеров и одного из тестовых образцов, с которым проводились основные исследования.

Лазерные сканеры, использовавшиеся в экспериментах

В экспериментах по сканированию тестовых образцов были использованы лазерные сканеры японской фирмы *Konica Minolta* двух моделей – Vi-910 и Vi-9i. Выбор именно этих сканеров связан с обеспечением ими очень высокой точности измерений (на уровне десятков микрометров, см. табл. 1) и благодаря этому они часто используются в практических работах по созданию 3D-моделей скульптурных памятников [9, 14].

Оба сканера являются оптическими приборами, принцип действия которых основан на использовании метода лазерной триангуляции.

Работа сканеров *Konica Minolta* в чем-то сродни работе обычного фотоаппарата, поскольку процесс сканирования ведется пораздельно. Из-за этого отдельные снимки поверхности (в практике лазерного сканирования их обычно называют сканами) не сгруппированы друг с другом, и для получения единой 3D-модели всей поверхности снимаемого объекта требуется выполнение специальной процедуры по “сшивке” (соединению) отдельных сканов в единое облако точек. В результате этого формируется та самая электронная 3D-модель

Таблица 1. Технические характеристики сканеров *Konica Minolta*

Тип сканера	Vi-910	Vi-9i
Метод измерений	лазерная триангуляция	лазерная триангуляция
Максимальная точность измерений, мм	± 0,1	± 0,05
Время сканирования, с	0,3–2,5	2,5
Размеры сканируемых объектов (по осям X, Y, Z), мм	от 111×83×40 до 1196×897×750	от 93×69×26 до 1495×1121×1750

исследуемого объекта, которая и несет в себе информацию о его размерах и геометрической форме.

Краткое описание тестового объекта

В качестве тестового объекта в работе использовался полированный металлический цилиндр диаметром 3 см и образующей 20 см.

В задачу исследований входило проведение лазерного сканирования тестового объекта, создание его 3D-модели и определение точности их соответствия друг другу.

Результаты исследования

Сканирование тестового объекта

При сканировании эталонного образца авторы работы столкнулись с проблемой появления бликов лазерного излучения от боковой поверхности металлического цилиндра. Наличие бликов в облаке точек приводило к потере информации об отдельных участках поверхности образца (на лазерных сканах в этих местах образовывались своеобразные “дыры”). Из-за этого пришлось использовать специальное антибликовое покрытие, представляющее собой мелкодисперсионную пудру. Это позволило сделать поверхность эталона равномерно матово-белой, а поскольку слой “пудры” был очень тонким (около 1–2 мкм), его присутствие не приводило к изменению исходной формы поверхности эталона. В результате этого при создании 3D-модели эталона не было необходимости учитывать влияние толщины антибликового покрытия.

Другой проблемой, с которой пришлось столкнуться в процессе сканирования эталона, была чрезмерно высокая однородность его поверхности. Наличие так называемых реперных точек на поверхности сканируемого объекта всегда является обязательным условием при создании его 3D-модели в процессе “сшивки” отдельных сканов. Для того чтобы решить эту проблему, перед началом сканирования на поверхности эталона были помещены небольшие (размером около 2×2 мм) кусочки пластилина. Они и стали теми самыми реперными точками, по которым в процессе обработки результатов сканирования определялось правильное расположение отдельных сканов друг относительно друга.

Сборка сканов в единую 3D-модель осуществлялась с помощью специализированной про-

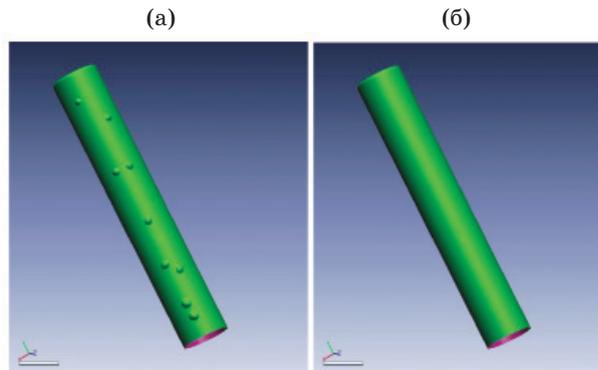


Рис. 1. Изображения 3D-модели эталона до (а) и после (б) применения процедуры Defeature.

граммы для обработки данных лазерного сканирования RapidForm 2006 (Inus Tech., Inc, Южная Корея). При этом те участки поверхности, которые содержали указанные реперные точки, обрабатывались в этой программе с помощью специальной процедуры Defeature. Эта процедура позволяет удалять локальные неровности или выступающие элементы, вместе с тем сохраняя общую форму реконструированной поверхности. В результате этого удалось избежать кропотливой обработки по локальному сглаживанию каждой отдельно взятой реперной точки (рис. 1).

“Сшивка” сканов и постобработка облака точек

Рассмотрим проведенную процедуру “сшивки” отдельных сканов более подробно. Характерной особенностью работы со сканерами *Konica Minolta* является (об этом уже говорилось выше) необходимость проведения “сшивки” (сборки) сканов отдельных фрагментов поверхности в единое облако точек. Для этого необходимо последовательное проведение нескольких процедур.

Процедура сборки сканов для сканеров *Konica Minolta* подробно описана в работе [15]. В данном конкретном случае она включала выполнение следующих операций.

1. Группировка. Данная операция подразумевает сопоставление хаотично расположенных сканов друг с другом. При этом необходимо наличие на сканах как минимум 3-х общих (реперных) точек на поверхности двух лежащих фрагментов частей реконструируемого объекта. Выше уже говорилось о том, что при

сканировании эталона сканерами *Konica Minolta* реперные точки искусственно сформировали на регистрируемой поверхности, зафиксировав на ней небольшие кусочки пластилина.

2. Математический расчет. Данная операция проводилась дважды: с группами по четыре скана и с конечным набором данных (облаком точек, собранным из всех отдельных сканов). Эта операция осуществлялась с целью минимизации локальных погрешностей соединения однородных по форме сканов.

3. Сшивка. Эта процедура, так же как и математический расчет, осуществлялась дважды – с группами по четыре скана и с конечным набором данных.

Далее проводилась дополнительная обработка поверхности с целью выявления погрешностей сканирования на каждой из двух моделей, полученных на разных сканерах (*Konica Minolta Vi-910* и *Vi-9i*). Для этой цели использовалась специальная операция, выполняемая в программе *RapidForm 2006* и называемая “сглаживание поверхности”. Она позволяет усреднить разброс положения отдельных точек реконструированной поверхности, вызванный погрешностью измерений. Кроме того, при обработке 3D-модели использовалась уже упомянутая выше процедура *Defeature*.

Оценка точности соответствия созданной 3D-модели эталону

Для выявления общей погрешности сканирования тестового образца и результатов обработки полученных данных была построена математическая модель цилиндра. Для этого воспользовались специальными встроенными функциями программы *RapidForm XOR*, которые позволили построить геометрически правильный цилиндр с характеристиками эталонного образца (диаметром 3 см и образующей 20 см). Построенную таким образом 3D-модель можно считать “идеальным цилиндром” и использовать ее как виртуальный эталон.

Так как построение математической 3D-модели в программе *RapidForm XOR* шло относительно модели, полученной путем сканирования, не было возможности воспользоваться специальной встроенной функцией этой же программы, называемой *Accurasy Analyzer*. Она служит для расчета среднего арифметического значения отклонения между наложенными друг на друга поверхностями двух 3D-моделей по всей их площади.

Таблица 2. Сравнение степени соответствия полигональных трехмерных моделей тестового объекта и модели эталона (3D-модели математически построенного цилиндра) для сканеров *Konica Minolta Vi-910* и *Vi-9i*

Модель сканера	Среднеарифметическое значение отклонения формы поверхности
Vi-910	0,04 мм
Vi-9i	0,05 мм

В табл. 2 приводятся среднеарифметические значения отклонения реальной и смоделированной поверхностей цилиндра друг относительно друга по двадцати отдельным точкам. Они получены в результате взаимного наложения 3D-модели эталонного цилиндра и 3D-моделей, полученных после обработки данных сканирования для каждого из двух сканеров (*Konica Minolta Vi-910* и *Vi-9i*). Качественные отличия поверхностей 3D-моделей эталона и тестового образца, полученные с помощью сканера *Konica Minolta Vi-910*, показаны на рис. 2 (переход цветов отражает различные степени расхождения точек поверхностей). Кроме того, с помощью той же самой программной процедуры *Accurasy Analyzer* проведено сравнение полигональных 3D-моделей друг с другом. Расхождение реконструированных поверхностей в этом случае составило 0,045 мм. Данное значение является подтверждением правильности проведенного исследования, так как разница паспортных значений точности сканеров *Vi-910* и *Vi-9i* составляет 50 мкм.

Заметим, что приведенное в табл. 2 среднеарифметическое значение отклонения форм поверхности тестового образца и эталонного цилиндра для сканера *Konica Minolta Vi-910* превосходит значение аналогичной величины для сканера *Vi-9i*, хотя паспортные значения точности измерений у последнего сканера выше. Это может быть связано с использованием при работе со сканером *Konica Minolta Vi-9i* большего фокусного расстояния, чем при работе со сканером *Vi-910*. Дело в том, что в этих сканерах предусмотрена возможность изменения фокусного расстояния, так как в процессе сканирования с разных ракурсов оператору заранее неизвестно точное расстояние от сканера до объекта. При этом факт уменьшения точности измерений при увеличении фокусного расстоя-

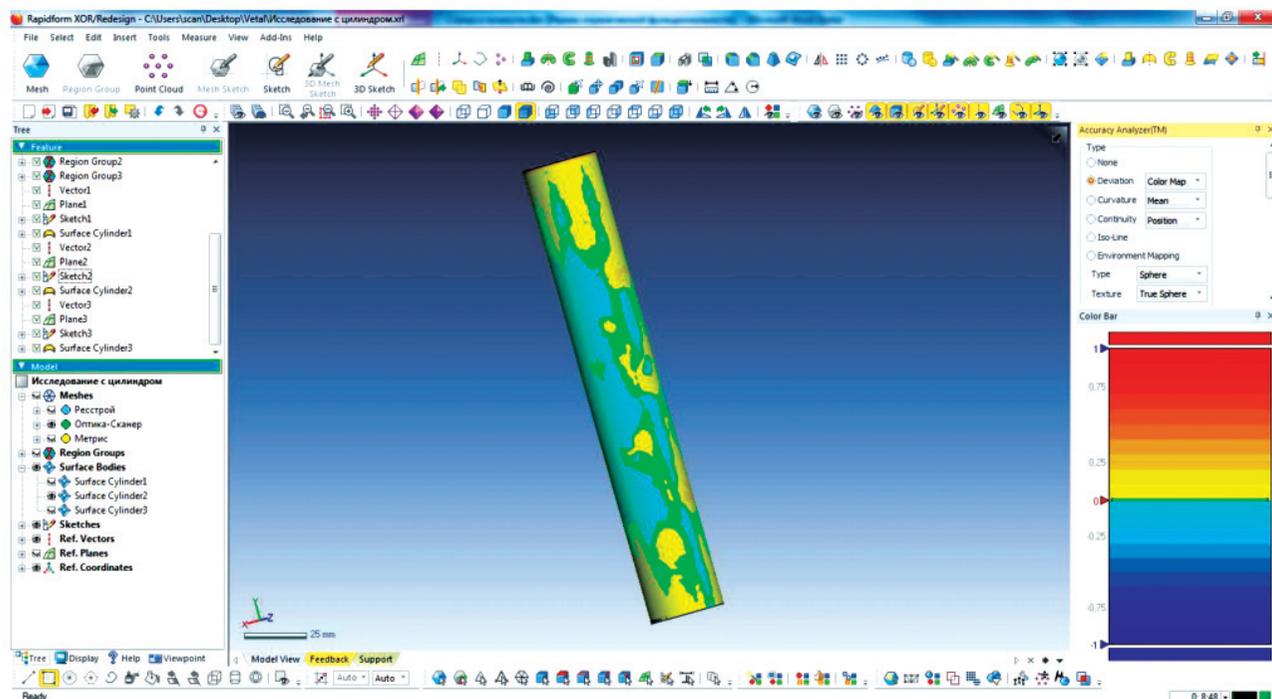


Рис. 2. Степень различия двух поверхностей 3D-моделей тестового объекта и эталонного цилиндра.

ния на устройствах *Konica Minolta* был установлен ранее в процессе исследования точностных характеристик 3D-сканеров [16].

Заключение

Проведенные исследования показывают, что при лазерном сканировании даже самых простых (с точки зрения геометрической формы поверхности) объектов создаваемая в результате обработки результатов сканирования электронная трехмерная модель может отличаться от исходного объекта.

В случае сканеров триангуляционного типа *Konica Minolta Vi-910* и *Vi-9i* при создании 3D-модели объекта в форме цилиндра размером 3×20 см среднее арифметическое значение отклонения исходной и реконструированной поверхностей невелико: она составляет около 40–50 мкм, что сопоставимо

с точностью измерений этих сканеров. Вместе с тем, при создании электронных 3D-моделей скульптурных памятников, в особенности с целью последующего изготовления их физических копий, вопросам методики сканирования и последующей компьютерной обработки его результатов даже в случае использования описанных в статье высокоточных сканеров *Konica Minolta* требуется уделять пристальное внимание. Поэтому авторы статьи предполагают продолжить исследования, связанные с рассмотрением этой проблемы. В частности, предложенную в данной статье методику исследования точности измерений при 3D-сканировании авторы намерены использовать для выявления погрешностей и у других видов сканеров.

В заключение авторы выражают признательность И.Д. Григорьевой, принимавшей участие в работе.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Sansoni G., Trebecchi M., Docchio F. State-of-the-art and application of 3D- imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation // *Sensors*. 2009. V. 9. P. 568–601.
2. Канашиш Н.В. Съёмка железнодорожных станций методом лазерного сканирования // *Путь и путевое хозяйство*. 2008. № 7. С. 15–16.

3. *Бурцев А.А.* Инновационные технологии для автоматизации маркшейдерских работ при строительстве подземных сооружений // *Геопрофи.* 2011. № 7. С. 26–29.
 4. *Fontana R., Gambino M., Greco M., Pampaloni E., Pezzati L., Scopigno R.* High-resolution 3D-digital models of artworks // *Proc. SPIE.* 2003. V. 5146. P. 34–43.
 5. *Фрейдлин А.Я., Парфенов В.А.* Трехмерное лазерное сканирование и его применение для съемки архитектурных сооружений и реставрации памятников // *Оптический журнал.* 2007. Т. 74. № 8. С. 44–49.
 6. *Войнаровский А.Е.* Сочетание методов трехмерного лазерного сканирования и цифровой фотограмметрии для фиксации и обмера памятников архитектуры // *Реликвия (Реставрация. Консервация. Музеи).* 2009. № 21. С. 30–33.
 7. *Boehler W., Bordas V.M., Marbs A.* Investigating laser scanner accuracy // *Proc. XIX CIPA.* 2003. P. 189–194.
 8. *Lighti D., Harvey B.* The effects of reflecting surface properties on Time-of-Flight laser scanner measurements // *IAPRS. Ottawa.* 2002. V. 34(4). P. 87–95.
 9. *McIntosh J.R.* Comparison of the spatial accuracy of disparate 3D-laser point clouds in large scale 3D-modeling and physical reproduction projects for large Cultural Heritage structures / Thesis of Degree of Master of Science. Curtin University of Technology. December 2006. V. 1. P. 1–25.
 10. *Fowels P.St.* The garden temple at ince blundell: a case study in the recording and non-contact replication of decayed sculpture // *J. Cult. Heritage.* 2000. V. 1. P. S89–S91.
 11. *Tucci G., Bonora V.* Application of high resolution scanning systems for virtual moulds and replicas of sculptural works // *Proc. XXI CIPA.* 2007. P. 721–726.
 12. *Парфенов В.А.* Бесконтактное копирование мраморных скульптур с использованием лазерной технологии / В кн.: “Скульптура XVIII–XIX веков на открытом воздухе. Проблемы сохранения и экспонирования”. СПб.: Государственный музей городской скульптуры, 2010. С. 66–69.
 13. *Tishkin V.O., Parfenov V.A.* Coping the marble bust `Primavera`: first case study in Russia of non-contact laser recording and replication of stone Cultural Heritage // *Technical Progr. 14th Inter. Conf. on Laser Optics.* St. Petersburg, Russia. 28 June–2 July, 2010. Paper TuZ1-04. P. 91.
 14. *Sansoni G., Docchio F.* 3D-optical measurements in the field of cultural heritage: the case of Vittoria Alata of Brescia // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2005. V. 54. P. 359–368.
 15. *Тишкин В.О.* Методика сборки и обработки данных, полученных в процессе 3D-сканирования // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО.* СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. № 1(71). С. 87–93.
 16. *Тишкин В.О., Вершинин А.Н.* Анализ технического состояния 3D-сканера // *Сб. тр. конф. молодых ученых “Оптоинформатика, наносистемы и теплотехника”.* СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. В. 3. С. 176–179.
-