

ТРЕХМЕРНОЕ ЛАЗЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ СЪЕМКИ АРХИТЕКТУРНЫХ СООРУЖЕНИЙ И РЕСТАВРАЦИИ ПАМЯТНИКОВ

© 2007 г. А. Я. Фрейдин

ЗАО “Геостройизыскания”, Москва

E-mail: freydin@gsi2000.ru

Рассмотрены принципы трехмерного лазерного сканирования как метода получения высокоточных данных о форме и размерах объектов. В качестве примера возможностей данного метода приведены результаты практического использования лазерного сканера Leica HDS3000 для съемки архитектурных сооружений и исторических памятников.

Коды OCIS: 150.0150.

Поступила в редакцию 22.02.2007.

Введение

Данная статья посвящена рассмотрению трехмерного лазерного сканирования – нового быстро развивающегося научно-технического направления в области измерительной лазерной техники [1–14]. Его основные применения связаны с решением самых разнообразных инженерных задач (проектирование, реконструкция, строительство и т. д.). Однако в последнее время появился значительный интерес к использованию лазерного сканирования и в области сохранения культурного и исторического наследия, в частности, для создания виртуальных трехмерных копий произведений искусства, архитектурных памятников и археологических объектов [4, 8–14].

В основе метода лазерного сканирования лежит определение координат отдельных регистрируемых точек на поверхности измеряемого объекта по трем измерениям (X , Y и Z), которое выполняется с помощью высокоточного скоростного (десятки тысяч измерений в секунду) лазерного дальномера. Принцип сканирования заключается в том, что после измерения координат отдельной фиксированной точки на поверхности объекта лазерный пучок разворачивается на некоторый заданный угол для того, чтобы перейти на следующий узел мнимой координатной сетки, где вновь производится определение координат. Так продолжается до тех пор, пока не будет просканирована вся поверхность объекта.

Повышение плотности узлов в координатной сетке повышает количество отснятых точек, а это увеличивает детальность съемки. Координаты отдельных точек, полученные в результате сканирования объекта, объединяются в группы, называемые облаками точек. Количество точек в облаке варьируется от нескольких сотен до сотен тысяч (а порой и миллионов). Измеряя расстояние и зная угол отклонения лазерного луча в горизонтальной и вертикальной плоскостях, можно получить трехмерные

координаты каждой отдельно взятой точки в системе координат сканера, а затем с помощью дополнительных операций и специализированного программного обеспечения привязать полученное облако точек к любой другой системе координат.

Первые приборы, работающие по такому принципу, появились в конце 1980-х – начале 1990-х годов. Одним из мировых лидеров по производству коммерческих лазерных сканеров сегодня является компания “Leica Geosystems”. А началось все с того, что в 1992 году специалисты другой американской компании – Cyra Technologies (которая позднее стала одним из подразделений “Leica Geosystems”) – столкнулись с проблемой создания чертежей сложных производственных объектов. При работе с доступными в то время способами съемки на создание каждого чертежа затрачивалось огромное количество времени и сил. В итоге это привело к тому, что компания решила разработать свою собственную измерительную систему, которая бы отвечала повышенным требованиям к точности и скорости измерений. Так родилась идея создания трехмерного лазерного сканера [2].

Работа большинства лазерных сканеров основана на использовании импульсных лазерных дальномеров. Сканирование лазерным пучком осуществляется шаговыми электромоторами с закрепленными на них зеркалами. Одно из зеркал отклоняет луч лазера в горизонтальной плоскости, а другое – в вертикальной (рис. 1).

В последнее время все чаще используется другая система сканирования, в которой луч лазера в горизонтальном направлении отклоняется не зеркалом, а с помощью вращения сканера вокруг собственной оси. Это позволяет осуществлять съемку всего окружающего сканер пространства. Так, например, в лазерном сканере Leica ScanStation поле зрения составляет 360° по горизонтали и 270° по вертикали (рис. 2). При такой системе сканирова-

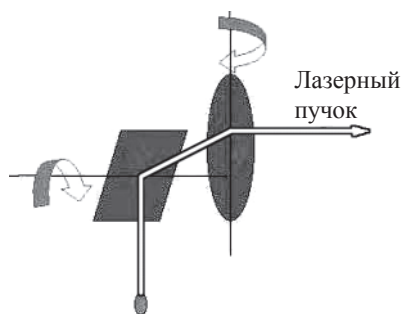


Рис. 1. Принцип действия лазерного сканера.



Рис. 2. Лазерный сканер Leica HDS3000.

ния предъявляются очень жесткие требования к угловой точности шаговых электромоторов, поскольку наряду с точностью измерений лазерного дальномера этот параметр определяет точность измерения координат точек объекта. Современные лазерные сканеры (например, модель Leica ScanStation) обладают встроенной цифровой фотокамерой, которая служит для фотосъемки окружающего сканер пространства, в результате чего пользователь сможет увидеть на экране панорамную фотографию. В дальнейшем это дает возможность выбрать из общей фотографии только то, что требуется для достижения результата, избежав сканирования ненужных фрагментов, и, как следствие, потерь времени.

Именно быстродействие, а также очень высокая точность измерений рельефа поверхности снимаемых объектов (до 200 мкм при дальности съемки несколько десятков метров и до 50 мкм при съемке с расстояния около 0,5 м [4, 9, 11]) стали определяющими факторами, способствовавшими бурному развитию метода 3-мерного лазерного сканирования. Говоря о методе лазерного сканирования, необходимо хотя бы вкратце затронуть проблему 3-мерного моделирования объектов в целом и сравнить данный метод с другими методами геодезической съемки.

Заметим, что в течение последних 10–15 лет значительно возросла потребность в создании 3-мерных моделей объектов с целью их визуального представления потребителям и документирования информации об этих объектах. Наиболее характерными примерами областей, где требуется подобная информация, являются промышленность, медицина, компьютерная анимация, архитектура и музейное дело.

До появления метода лазерного сканирования основными методами, позволяющими проводить съемку объектов и их последующую 3-мерную реконструкцию, были фототеодолитная съемка с фотограмметрической обработкой полученных фотоснимков и съемка с помощью электронных тахеометров с безотражательным дальномером.

Фототеодолитная съемка предполагает создание единичного фотоснимка либо стереопары снимков объекта. После трансформации снимков и их привязки выполняется фотограмметрическая обработка снимков, подразумевающая их дешифрирование. В результате такой обработки из фотоснимка выделяются характерные детали объекта, после чего формируется его векторное изображение.

Основным достоинством данного метода является высокая скорость съемки (фотофиксация), значительно сокращающая этап полевых работ. В то же время, несмотря на возможность автоматизации измерений, при обработке фотографических изображений неизбежно происходит потеря информации об отдельных частях поверхности объекта. С другой стороны, для увеличения точности реконструкции объекта большое количество измерений приходится выполнять вручную, поэтому точность, получаемая при фототеодолитной съемке с последующей фотограмметрической обработкой полученных фотоснимков, оказывается невысокой (она составляет несколько сантиметров).

Что касается съемки с помощью электронного тахеометра с безотражательным дальномером, то данный метод геодезических измерений состоит в последовательной фиксации координат характерных точек архитектурного объекта. Главное достоинство

данного метода – высокая точность каждого отдельного измерения, основной недостаток – низкая скорость съемки из-за необходимости точного “ручного” наведения на каждую снимаемую точку объекта. По сравнению с фотограмметрическим методом данный метод обеспечивает более высокую точность измерений (несколько миллиметров), но занимает больше времени.

Трехмерное лазерное сканирование лишено недостатков указанных выше методов. Время лазерной съемки не зависит от геометрии снимаемого объекта, а определяется только требуемым разрешением при сканировании. Это позволяет сочетать высокую скорость съемки с очень высокой точностью измерений. При этом участие человека в процессе измерений сведено к минимуму – оператору сканера достаточно лишь задать область сканирования и дождаться окончания процесса съемки. Следовательно, полностью исключается так называемый человеческий фактор.

Еще одно несомненное преимущество лазерного сканирования – возможность проведения измерений в труднодоступных местах. И если, например, съемка подводных объектов – это пока отдаленная перспектива, то измерения под землей (при съемке археологических объектов и исторических памятников) уже давно применяются на практике.

Таким образом, 3-мерное лазерное сканирование – это современный высокопроизводительный метод измерений, являющийся серьезной альтернативой традиционным видам геодезической съемки. Единственное, в чем он пока им уступает, это существенно более высокая стоимость оборудования.

В последующих разделах описываются принципы работы лазерных сканеров и их основные применения.

Технология 3-мерной лазерной съемки

Технология съемки объектов с применением лазерного сканера находится в сильной зависимости от геометрии и типа снимаемого объекта. Порой для достижения требуемого результата приходится многократно переставлять сканер с места на место, выполняя съемку отдельных деталей и фрагментов. Причиной тому становится наличие “мертвых зон”, возникающих из-за многих обстоятельств. Например, снимаемый объект может представлять собой старинное здание. В этом случае для съемки всех внешних поверхностей здания в процессе работы приходится переставлять сканер как минимум два-три раза. Часто ситуация осложняется, если вблизи снимаемого здания находятся растущие деревья, близко расположенные автомобили, другие здания и прочие посторонние объекты. В таких случаях

приходится значительно увеличивать количество точек съемки.

Естественно, в последующем возникает задача приведения отснятого материала в некую единую систему координат, которая, как правило, задается заказчиком выполняемых работ. С этой целью во время съемки на объекте или рядом с ним устанавливаются специальные марки, с помощью которых впоследствии производится объединение облаков точек, полученных с мест различных стоянок сканера.

Стоит отметить, что для пространственной трансформации облаков точек требуется как минимум 3 марки на каждую пару точек размещения сканера. Эти три марки должны быть видны со смежных точек размещения. Сам процесс объединения облаков точек выполняется с помощью специального программного обеспечения Cyclone-REGISTER.

Перед началом выполнения любых видов работ с помощью лазерного сканера крайне важно четко сформулировать задачу и хорошо представлять конечный результат измерений. От этого в значительной степени будут зависеть плотность измеряемых точек на снимаемом объекте и, как следствие, затраченное на это время.

Обработка результатов измерений

Выше мы уже отчасти коснулись вопроса обработки данных, когда речь шла о регистрации отдельных облаков точек в единой системе координат. Однако технология обработки не ограничивается одной лишь регистрацией.

После окончания сканирования получается огромный массив точек, детально описывающий объект съемки (рис. 3). По сути, мы получаем своего рода точечную трехмерную модель, отражающую все детали объекта. Следующий логический этап работы – извлечение из полученного набора дан-

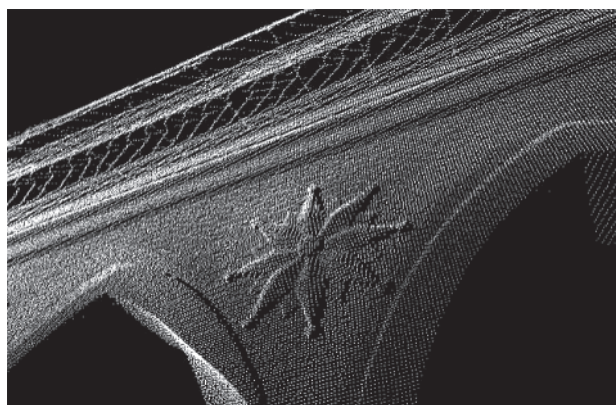


Рис. 3. Облако точек барельефного элемента фасада здания.

ных того необходимого, что приведет к конечному результату.

В упомянутом выше комплексе программ Cyclone существуют специальные модули для обработки облаков точек – Cyclone-MODEL, Cyclone-SURVEY, CloudWorx. Результатом обработки данных с помощью названных программных модулей может быть, например, получение изображения сечения объекта по заданной плоскости или составление его трехмерной модели с использованием набора графических примитивов. Кроме того, можно легко измерить расстояния между такими точками, куда невозможно или опасно посылать человека с рулеткой.

По результатам сканирования не составляет большого труда выполнить и чертеж объекта. Все эти действия пользователь проводит на экране компьютера с точечной моделью объекта, которая может легко поворачиваться и перемещаться в пространстве.

Применение 3-мерного лазерного сканирования

Одной из сфер применения, где наиболее полно используются возможности лазерного сканера, является архитектура и реставрация исторических объектов. Безусловно, для архивирования информации о таких объектах существуют различные способы фиксации изображений, например, фотография. Но фотография не дает трехмерных координат и не может передать объемные свойства предметов. Остаются еще стереофотографии и голограммы, которые хотя и передают объемность изображения, но все же больше всего подходят для визуального восприятия объекта, так как извлечение данных о координатах точек из стереопары фотографий и голограмм сопряжено с огромными сложностями.

А вот лазерное сканирование дает возможность провести съемку фасада здания в считанные часы. Правда, в тех ситуациях, когда требуется повышенная детальность съемки, на эту работу может потребоваться несколько дней, но при этом мы можем получить модель исторического объекта с точностью фиксации отдельных деталей до нескольких миллиметров. С этой точки зрения сегодня не существует реальной альтернативы лазерному сканированию.

Имеющееся на сегодняшний день оборудование позволяет фиксировать детали объекта вплоть до 1–2 мм. Безусловно, подобные возможности оборудования являются крайне полезными. Однако здесь необходим компромисс между избыточностью данных при лазерном сканировании и необходимостью получения максимально полного изображения.

Как же выбрать правильное разрешение при лазерном сканировании в архитектуре? Конечно, на каждом конкретном объекте будет складываться каждый раз иная ситуация, но общие правила сформулировать возможно. На выбор детальности сканирования оказывает влияние сама геометрия объекта. Исторические объекты характеризуются наличием большого количества довольно мелких деталей. Зная ориентировочный размер этих элементов, их сканирование надо проводить с разрешением, позволяющим увидеть их на экране компьютера и использовать при обработке. С другой стороны, нет никакого смысла в сверхдетальном сканировании плоских стен здания. Разумным решением в этом случае является подход, при котором сканирование малозначимых элементов проводится при низком разрешении, например, 4–6 см.

При значительных габаритах объекта такое разрешение дает общее описание объекта. Сканирование же деталей проводится при разрешении 0,5–2 см, что обеспечивает комплексный подход к решению задачи. При этом не теряется детализация мелких объектов и одновременно затраты времени на сканирование всего объекта становятся адекватными получаемому результату.

Список областей приложения лазерного сканирования, безусловно, не ограничивается только лишь архитектурой, его можно продолжать очень долго, но куда более важно обозначить те условия, при которых возникает потребность в таком методе съемки. Прежде всего стоит отметить условие необходимости получения по возможности максимально полной информации, детально описывающей некий объект, имеющий сложную геометрию. Следующим условием, определяющим необходимость использования лазерного сканирования, является скорость получения данных об объекте. Сочетание двух этих условий дает неоспоримые преимущества трехмерного лазерного сканирования перед другими методами съемки при фиксации геометрически сложных объектов.

Использование 3-мерного лазерного сканирования при реставрации исторических памятников

В качестве наглядного применения лазерного сканирования рассмотрим результаты работ, которые были выполнены производственным отделом ЗАО “Геостройизыскания” при съемке внешнего фасада и внутренних стен Большого Екатерининского дворца в усадьбе Царицыно г. Москва (рис. 4). Для этих измерений использовался трехмерный лазерный сканер Leica Geosystems HDS3000 на базе



Рис. 4. Фотография центрального фасада Большого Екатерининского дворца.

импульсного Nd:YAG-лазера, имеющего следующие параметры: длина волны излучения 532 нм, длительность импульса 0,25 нс, средняя мощность около 1 мВт.

В данном случае лазерное сканирование явилось лишь частью большой работы, главной целью которой была реконструкция дворца. Эта работа как нельзя лучше показала важность использования различных измерительных технологий. Для привязки полученных сканов к системе координат использовались традиционные геодезические методы. С помощью электронного тахеометра SOKKIA SET530R была создана опорная геодезическая сеть, которая стала основой для привязки полученных облаков точек к местной системе координат. В процессе рекогносцировки были определены места, в которых в последующем устанавливался лазерный сканер. Точки выбирались таким образом, чтобы, с одной стороны, избежать появления “мертвых” зон, а с другой стороны, избежать большого количества стоянок сканера. Следующим этапом работ стало непосредственно трехмерное лазерное сканирование фасадной части и внутренних стен здания.

Большой дворец – это здание немалых размеров: его длина составляет около 150 м, а ширина – почти 35 м. Длительность работ составила 15 рабочих дней, включая сканирование и рекогносцировку. Сканирование фасада проводилось с 42 стоянок, внутренних стен – с 71 стоянки сканера. Исходя из целей работы, плотность определяемых точек была выбрана таким образом, чтобы составить на поверхности объекта сетку с шагом не менее 5 мм, т. е. не менее 40 000 точек на 1 м².

Такая плотность сканирования позволяет проводить обрисовку элементов фасада и внутренних стен с высокой степенью детализации (вплоть до каждого кирпича). Сканирование поверхностей фаса-

да, на которых расположены элементы барельефа, проводилось с шагом не менее 4 мм, т. е. не меньше чем 60 000 точек на 1 м². Перед началом сканирования в зонах перекрытия сканов были размещены специальные марки, служащие для совмещения отдельных сканов в единое геометрическое пространство с высокой степенью точности. Максимальная ошибка сети в плане составила 9 мм, по высоте – 3 мм. Результаты уравнивания затем были переданы в программный комплекс Cyclone для дальнейшей обработки результатов сканирования.

Завершающим этапом работы является создание трехмерных моделей отдельных участков здания, чертежей фасадов, каркасной модели и сечений по заданным плоскостям (рис. 5, 6).

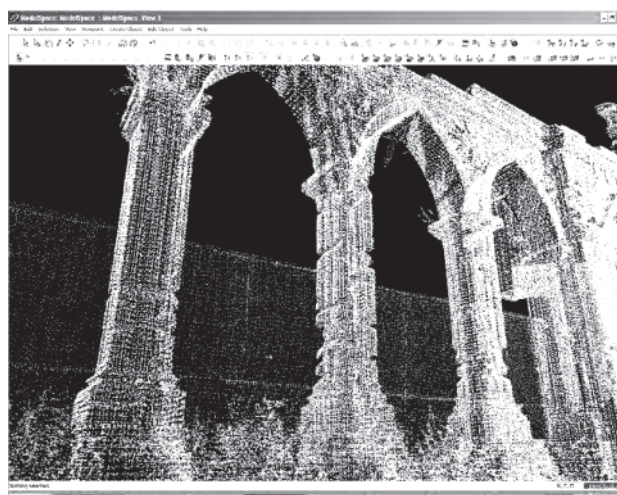


Рис. 5. Облако точек наиболее разрушенной части фасада.

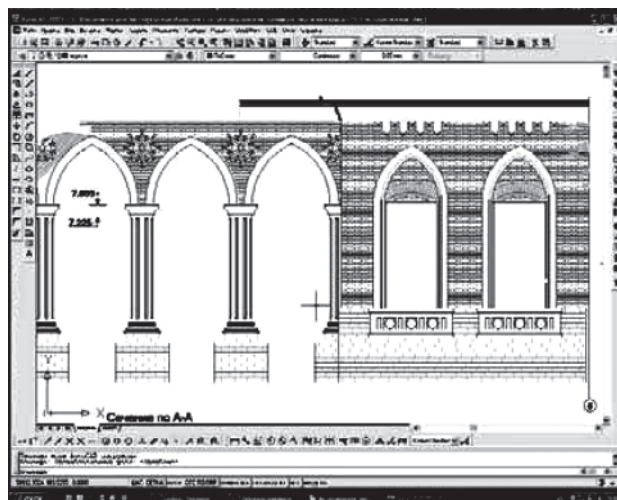


Рис. 6. Пример фасадного чертежа.

Заключение

В заключение отметим, что метод трехмерного лазерного сканирования в последнее время становится все более востребованным на предприятиях, специализирующихся на выполнении производственных работ. Авторы выражают надежду, что данная статья поможет заинтересованному читателю сформировать для себя более четкие представления об основах этой новой технологии и возможностях ее использования на практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Dimsdale J.* Feature: Laser Scanners. Past, Present, and Future // Professional Surveyor Magazine". 2005. April.
2. *Boehler W., Marbs A.* Investigating Laser Scanner Accuracy // <http://scanning.fh-mainz.de>.
3. *Кукушкин Д.А.* Проведение работ по наземному лазерному сканированию // Геопрофи. 2005. № 2.
4. *Remondino F., Guarnieri A., Vettore A.* 3D modelling of close-range objects: Photogrammetry or laser scanning? // Proc. SPIE. 2005. V. 5665. P. 216–225.
5. *Forest J., Salvi J.* A review of laser scanning three-dimensional digitisers // IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Systems. 2002. V. 1. P. 73–78.
6. *Axelsson P.* Processing of laser scanner data – Algorithms and applications // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 1999. V. 54. P. 138–147.
7. *Beraldin J.-A., Blais F., Cournoyer L., Rioux M., Bernier F., Harrison N.* Portable digital 3-D imaging system for remote sites // Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 1998. V. 5. P. 488–493.
8. *Picard A., El-Hakim S., Godin G., Valzano V., Bandiera A.* Combining 3D technologies for cultural heritage interpretation and entertainment // Proc. SPIE. 2005. V. 5665. P. 108–118.
9. *Fontana R., Gambino M., Gianfrate G., Greco M., Pampaloni E., Pezzati L.* A 3D scanning device for architectural survey based on time-of-flight technology // Proc. SPIE. 2004. V. 5457. P. 393–400.
10. *Ricci R., Fantoni R., Ferri De Collibus M., Fornetti G., Guarneri M., Poggi C.* High resolution laser radar for 3D imaging in artwork cataloguing, reproduction and restoration // Proc. SPIE. 2003. V. 5146. P. 62–73.
11. *Fontana R., Gambino M., Gianfrate G., Greco M., Marras L., Materazzi M., Pampaloni E., Pezzati L.* Time of flight laser scanner for architectural and archaeological applications // Proc. SPIE. 2003. V. 5146. P. 185–193.
12. *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.
13. *Toylor J., Beraldin J.-A., Godin G., Cournoyer L., Baribeau R., Blais F., Rioux M., Domey J.* NRC 3D imaging technology for museum and heritage applications // J. Visualization and Computer Animation. 2003. V. 14. P. 121–138.
14. *Bordone A., Ferri De Collibus M., Fantoni R., Fornetti G., Guarneri M., Poggi C., Ricci R.* Development of a high resolution laser radar for 3D imaging in artwork cataloguing // Proc. SPIE. 2002. V. 5131. P. 244–248.