

ФИКСАЦИЯ ПАМЯТНИКОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СЪЕМКИ

*д-р техн. наук, доц. М. Г. МУСТАФИН, канд. техн. наук, доц. В. А. ВАЛЬКОВ
(Санкт-Петербургский горный университет, Россия)*

e-mail: Mustafin_MG@pers.spmi.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9416-2358>

e-mail: Valkov_VA@pers.spmi.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2257-856X>

Фиксация объектов культурного наследия является необходимым методом, обеспечивающим их сохранение. Качественная фиксация дает информацию о современном состоянии объекта культурного наследия. Систематическая фиксация позволяет отслеживать как геометрические изменения, так и архитектурно-художественные отличия его облика, произошедшие вследствие реставраций или процессов природного характера. Таким образом, данные фиксации составляют основу сохранения объектов культурного наследия. Фиксация связана с проведением обмерных работ. Последние регламентированы и весьма эффективны с применением метода лазерного сканирования как средства получения наиболее полной и достоверной информации о геометрии объекта на конкретный момент времени. Технология проведения наземной лазерной съемки рассмотрена в ряде работ. Уделено большое внимание подготовке съемочных работ и построению модели объекта. В то же время достижение и контроль точности построения трехмерных моделей памятников культурного наследия остается важной научно-практической задачей. В этой связи в статье, помимо описания технологии наземной лазерной съемки, приводятся методические аспекты обеспечения и контроля точности модели объектов культурного наследия.

Ключевые слова: *объекты культурного наследия, сохранение, фиксация, обмерные работы, наземное лазерное сканирование, точность измерений, метод наименьших квадратов, ориентирование сканов, трансформация координат.*

RECORDING CULTURAL HERITAGE MONUMENTS USING TERRESTRIAL LASER SURVEYING

M. MUSTAFIN, V. VALKOV

(Saint Petersburg Mining University, Russia)

Recording of cultural heritage objects is a necessary method for ensuring their preservation. High-quality recording provides information on the current state of a cultural heritage object. Systematic recording allows tracking both geometric changes and architectural and artistic differences in its appearance that occurred as a result of restorations or natural processes. Thus, these recordings form the basis for preserving cultural heritage objects. Recording is associated with survey work. The latter are regulated and highly effective when using the laser scanning method as a means of obtaining the most complete and accurate information about the geometry of an object at a specific point in time. The technology of ground-based laser imaging for measurement work is considered in a number of pa-

pers. At the same time, great attention was paid to the preparation of filming and the construction of a model of the object. At the same time, achieving and controlling the accuracy of constructing three-dimensional models of cultural heritage monuments remains an important scientific and practical task. In this regard, in addition to describing the technology of ground-based laser photography, the article provides methodological aspects of ensuring and controlling the accuracy of the model of cultural heritage objects.

Keywords: *cultural heritage sites, preservation, fixation, surveying, ground-based laser scanning, measurement accuracy, least squares method, scan orientation, coordinate transformation.*

В нормативном документе Российской Федерации ГОСТ Р 56905-2016 «Проведение обмерных и инженерно-геодезических работ на объектах культурного наследия» [1] обозначены требования к точности обмерных чертежей. Дано определение: вид чертежной документации, фиксирующей результаты обмеров архитектурных сооружений, деталей пластического декора, параметров монументальной скульптуры, объектов декоративно прикладного искусства. Как видно из этого определения, степень детализации в обмерных чертежах должна обеспечить полную фиксацию состояния объекта, соответственно, при этом должны быть соблюдены точные размеры всех элементов рассматриваемого объекта. В этой связи была составлена классификация обмерных чертежей по точности, которая фактически разграничивает методы фиксации (таблица).

Таблица. – Требования к точности обмерных чертежей

Масштаб	Вид чертежа	Предельная погрешность, мм
1:1 – 1:20	Чертежи деталей, шаблонов, прорисей	1-2
1:50	Чертежи планов, разрезов, фасадов	2-5
1:100	Чертежи планов, разрезов, фасадов	10-20
1:200	Обзорные чертежи планов, разрезов, фасадов	30-50
1:500	Схемы	200-300

Так, обеспечение чертежей деталей, шаблонов, прорисей, безусловно, – наиболее филигранная работа, которая достигается применением комплекса методов, в том числе, фотосъемки, зарисовок, лазерного сканирования и др., но при этом чертежи относятся к отдельным фрагментам объекта. Далее следуют чертежи менее точные, но охватывающие большие фрагменты объекта (фасады и модели объекта целиком). Эта классификационная область может быть успешно выполнена с применением технологии наземной лазерной съемки (НЛС).

Технология НЛС. В ряде работ приводится описание проведения НЛС [1–11]. Вместе с тем мало внимания уделяется научному обоснованию создания проекта съемочной сети и обеспечению требуемой точности положений точек лазерных отражений (ТЛО) или, в конечном итоге, цифровой модели объекта. Довольно подробно технология НЛС приведена в работе [12]. Рассмотрен процесс съемки НЛС, включающий проектирование опорной и съемочной сетей, предрасчет точности ТЛО с применением метода наименьших квадратов и построение в целом модели объекта. Разработана методика и программа автоматизированного проектирования съемочной сети, предусматривающая использование единичного сектора охвата лазерного сканера. Его размеры выбираются в диапазоне от + 68 до -68 градусов, в зависимости от точности, которую следует достичь с учетом СКП используемого сканера.

Так, при использовании сканера Leica P30 (СКП = 1,2 мм+10 ppm) точности в указанном диапазоне углов (сектора сканирования) СКП положения ТЛЮ варьируют в среднем от 2 до 7 мм. Формирование модели объекта предполагается с использованием стандартного программного обеспечения, например, Trimble RealWorks, Cyclone, Autodesk Recap Pro и Leica Cyclone. При этом остаются вопросы оптимального размера перекрытий сканов и способов уточнения точности построения цифровых моделей.

Пути повышения точности НЛС. В результате съемки по технологии НЛС получается облако точек. Для объединения облаков точек (сканов) в единую модель выполняют их ориентирование. Существует много алгоритмов для выполнения данной задачи. Одним из наиболее популярных методов является итеративный алгоритм ближайшей точки (ICP), который реализован в большинстве программных продуктах [13–15]. Однако ICP не всегда качественно способен выполнять регистрацию с необходимой точностью. Можно выделить признаки, которые отрицательно влияют на конечный результат:

- малый размер перекрытия между соседними облаками (менее 30%);
- отсутствие плоскостей в разных направлениях относительно сканирующей системы;
- невыраженные углы и ребра;
- большой уровень шума (переотражение, движущиеся объекты).

Рассмотрено несколько примеров, с регистрацией которых ICP не смог справиться в нужной степени. При регистрации в ПО Autodesk ReCap данных НЛС железнодорожного моста баланс оказался равен менее 1%, что говорит о возможном смещении точек друг относительно друга, а совпадение приблизилось к пороговому значению 20% – малое количество общих функций. После загрузки сканов в Autodesk AutoCAD и их визуальной оценки были выявлены расхождения вплоть до 10 см. Аналогично, регистрация выполнялась в Faro Scene и CloudCompare. В первом расхождения оказались идентичными ReCap, что может говорить о схожести работы алгоритма, во втором расхождения между двумя облаками точек составили около 0,5 м, то есть программа не справилась с ориентированием ТЛЮ сканов. Также программы не справляются, когда сканы относятся к схожим, но совершенно разным поверхностям, например, при рассмотрении береговых территорий программа «не знает» что принять за основную поверхность.

Можно по-разному решить возникающую проблем: увеличить число станций сканирования, сканерных марок или, например, использовать спутниковое оборудование. Предлагаются следующие методики. Первая служит для уточнения плоскостей ориентирования и использует уже полученные сканы. Методика основана на идее вычисления нормалей для точек лазерного отражения (ТЛЮ) и определения углов между этими нормальями и направлениями на станции сканирования. В результате будут отбрасываться точки, величина угла направления которых превышает заданный параметр. Вторая методика – это использование контрольных точек, полученных в результате тахеометрической съемки.

Первая предлагаемая методика включает 4 ступени реализации. Опишем их, представив условное сканирование с двух соседних станций сканирования А и Б.

1. Проверка зон видимости. Эффективна прежде всего в связи с «облегчением» облака точек за счет исключения лишних точек (движущиеся объекты, а также объекты, не принадлежащие обоим сканам).

2. Вычисление нормалей для точек каждого скана. Выполняется независимо для каждой станции на основе сравнения координат точек. Нормали к точкам сканирования представляют собой векторы, ориентированные перпендикулярно поверхности, которой принадлежит данная точка. При этом плоскость формируется соседними точками, т.е. строится модель, имитирующая объект рядом плоскостей.

3. Фильтр «хороших измерений». Осуществляется для каждой станции независимо. Оставляются только те точки, для которых разность углов между нормалью и априорно заданным углом не превышает некоторую точность. Такое условие обеспечивает использование ТЛЮ сканирования под «хорошими» углами ($50^\circ \dots 90^\circ$) и исключает точки поверхностей, которые видны со станции под острым углом. Разработан программный алгоритм такой фильтрации.

4. Определение элементов взаимного ориентирования алгоритмом ИСР. Получив набор точек в шагах 1–3, остается только осуществить регистрацию с помощью ИСР. В этом случае алгоритм сможет получить наиболее достоверный результат за счет упрощения вычислительных процессов и работы с практически готовым набором соответственных точек.

Проверка работы алгоритма была осуществлена на примерах, на которых штатное использование ИСР давало грубое ориентирование. Результаты по предлагаемой методике для специфических объектов оказались на порядок точнее.

Вторая предлагаемая методика состоит в возможности уточнения цифровой модели объекта, полученной по результатам наземной лазерной съемки, путем определения контрольных точек и их использования для корректирования координат точек лазерного отражения.

Следует отметить важный принцип, реализуемый при создании моделей по результатам сканирования объекта, который состоит в соединении в единый ансамбль множества сканов, полученных с независимых станций. Этот подход весьма перспективен в целом для геодезических измерений и существенно расширяет их возможности. Речь идет о свободных станциях и соединении результатов независимых измерений. Фактически созданы предпосылки для перехода от традиционных последовательных измерений, например, теодолитный или тахеометрический ход, в какой-то мере триангуляция или трилатерация, в дискретные измерения (дискретный ход), при которых выполняется соединение результатов измерений со свободных станций. Понятно, что при этом в значительной мере исключается ошибка накопления измерений.

В этой связи предлагается создание точечной (не детальной) модели объекта на основе тахеометрических измерений. Такая модель будет отражать достаточно точно (первые миллиметры, если использовать высокоточные электронные тахеометры) положение основных элементов объекта (стены, отдельные панели и др.). При ее построении следует использовать принцип соединения (сшивки) независимых измерений со свободных станций. Точки модели будут использоваться как контрольные для корректирования модели, построенной по технологии НЛС. При этом корректирование выполняется по координатам контрольных точек и точек, принадлежащих элементам триангуляционной модели объекта, построенной по ТЛЮ, для совмещения моделей и последующего уточнения. Совмещение разных систем координат выполняется по параметрам преобразования Гельмерта, которые позволяют корректирование ТЛЮ. Разработаны алгоритмы реализации такого подхода и программные модули, которые показали его эффективность.

Таким образом, в статье приведены ключевые аспекты использования технологии наземного лазерного сканирования, в том числе, для фиксации памятников культурного наследия. Показана важность подготовительного процесса применения НЛС и обработки результатов для уточнения модели объекта.

Следует отметить, что, не смотря на повсеместное применение лазерного сканирования при строительстве и фиксации объектов культурного наследия, нормативных документов, регламентирующих технологию его применения в России, пока не разработано. В этой связи роль геодезического контроля измерений и обеспечение требуемой точности чрезвычайно высока. В статье приведены новые методические принципы такой реализации наземной лазерной съемки, которые согласуются с традиционным геодезическим обоснованием измерений, протестированы на практике и модельных расчетах, показав при этом свою эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проведение обмерных и инженерно-геодезических работ на объектах культурного наследия. Общие требования : ГОСТ Р 56905-2016. – Введ. 29.03.2016 / Фед. агентство по техн. регулированию и метрологии. – М. : Стандартинформ, 2016. – 28 с.
2. Вальков, В. А. Методика уточнения цифровых моделей рельефа открытых горных выработок по материалам лазерного сканирования и аэрофотосъемки / В. А. Вальков, Е. О. Валькова, М. Г. Мустафин // Маркшейдерия и недропользование. – 2023. – № 3(125). – С. 40-52.
3. Шарафутдинова, А. А. Разработка методики наземного лазерного сканирования промышленных объектов для создания цифровых информационных моделей : дис. ... канд. техн. наук / А. А. Шарафутдинова. – 2023. – 198 л.
4. Опыт применения наземного лазерного сканирования при обследовании инженерных сооружений / Д. А. Афонин, Н. Н. Богомолова, М. Я. Брынь, А. А. Никитчин // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81 – № 4. – С. 2–8. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-958-4-2-8.
5. Середович, В. А. Исследование точности создания цифровых моделей рельефа и вычисления объемов насыпи и выемки горных пород на основе данных лазерного сканирования / В. А. Середович, М. А. Алтынцев, Р. А. Попов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 55. – С. 66–71.
6. An on-site approach for the self-calibration of terrestrial laser scanner / M. A. Abbas, D. D. Lichti, A. K. Chong, H. Setan, Z. Majid // In Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. – 2014. – Vol. 52. – P. 111–123.
7. Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities / A. Abellán, T. Oppikofer, M. Jaboyedo, N. J. Rosser, M. Lim, M. J. Lato // Earth Surf. Processes Landf. – 2014. – Vol. 39. – P. 80–97.
8. Biswas H. Planning for scanning using building information models: A novel approach with occlusion handling / H. Biswas, F. Bosché, M. Sun // In Proceedings of the 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining, Oulu, Finland, 15–18 June 2015.
9. Chan, T. O. Cylinder based self-calibration of a panoramic terrestrial laser scanner / T. O. Chan, D. D. Lichti // In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2012. – Vol. 39-B5. – P. 169–174.
10. Che, E. Multi-scan segmentation of terrestrial laser scanning data based on normal variation analysis / E. Che, M. J. Olsen // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. – 2018. – Vol. 143. – P. 233–248.
11. Mozaar, M. Optimal placement of a terrestrial laser scanner with an emphasis on reducing occlusions / M. Mozaar, M. Varshosaz // Photogramm. Rec. – 2016. – Vol. 31. – P. 374–393.
12. Шокер, Х. М., Геодезическое обеспечение использования технологии лазерного сканирования для фиксации памятников культурного наследия / Х. М. Шокер, М. Г. Мустафин // Геодезия и картография. – 2021. – Т. 82, № 2. – С. 2–10.

13. Козлов, Д. Алгоритм восстановления поверхности из облака точек на графическом процессоре / Д. Козлов, В. Турлапов // Нижегородский Государственный Университет им. Н.И. Лобачевского. – URL: <https://www.graphicon.ru/html/2010/conference/RU/Se5/44.pdf> (дата обращения: 28.04.2025).
14. Точные решения вариационной задачи алгоритма ICP в классе аффинных преобразований / А. Ю. Маковецкий, С. М. Воронин, Д. В. Тихоньких, М. Н. Алексеев // Челябинский физико-математический журнал. – 2017. – Т. 2, № 3. – С. 282–294.
15. Редько, А. В. Применение методов фильтрации в задаче построения поверхности по облаку точек / А. В. Редько, С. А. Глебов // Наука, техника и образование : электрон. журн. – 2017. – № СВ2(13). – С. 92–97.