

О. А. НИКИТИНА^{1, 2}

В. Л. КЛЕНИН¹, канд. техн. наук.

И.О. КОТОВЩИКОВ², канд. техн. наук.

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
(Санкт-Петербург, Россия)

² ООО «АктивТестГруп», (Санкт-Петербург, Россия)

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К АВТОМАТИЧЕСКОМУ ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕФЕКТОВ, ВЫЯВЛЕННЫХ ПРИ ФЛЮОРЕСЦЕНТНОМ КАПИЛЛЯРНОМ КОНТРОЛЕ

Аннотация. Рассмотрены существующие методы совместной калибровки цифровой камеры и лазерного сканера для совмещения цифровых изображений с данными лазерного сканирования. По результатам сравнительного анализа предложено перспективное направление разработки многоплоскостного калибровочного образца с круглыми отверстиями.

Ключевые слова: флуоресцентный капиллярный контроль, цифровая камера, 2D-лазерный сканер, совместная калибровка, совмещение данных, калибровочный образец.

Введение

Капиллярный метод неразрушающего контроля широко применяется для обнаружения поверхностных дефектов изделий в авиационной промышленности, благодаря высокой чувствительности и относительной простоты реализации. Использование автоматизированных систем серии КАМА позволило обеспечить высокую повторяемость проведения контроля за счёт нанесения пенетранта под вакуумом методом распыления через систему форсунок [8]. Несмотря на значительный уровень автоматизации технологического процесса, принятие решения об отбраковке изделия по-прежнему во многом зависит от опыта оператора. В связи с этим актуальной является задача повышения достоверности, повторяемости и воспроизводимости результатов контроля, автоматизации анализа изображений, получаемых после флуоресцентного капиллярного контроля, в частности оценка геометрических параметров выявляемых дефектов.

Совместное применение камеры машинного зрения и лазерного 2D-сканера позволяет объединить взаимодополняющую информацию об исследуемом объекте. Цифровое изображение содержит сведения о границе объекта, его размерах в пикселях в проекции на плоскость матрицы, местоположении и границы составных элементов объекта контроля, цвете и визуальных особенностях поверхности. Это не позволяет в полной мере оценить метрологические параметры выявленных индикаций. Лазерный сканер, напротив, обеспечивает получение геометрических данных о поверхности в метрической системе, но не регистрирует её цветовые характеристики.

Совместный анализ результатов измерений позволит получать выявленные индикации и оценивать их геометрические характеристики, что будет основой, для установления метрологических характеристик при оценке контроля качества и дальнейшей эксплуатации.

Данный подход требует определения взаимного положения датчиков и установления соответствия между системами координат лазерного профиля и пиксельного изображения.

Решение этой задачи осложняется различиями полей зрения датчиков, а также возможными погрешностями калибровки. В связи с этим актуальной является систематизация существующих методов калибровки и совмещения данных лазерного сканирования с цифровыми изображениями, а также анализ их преимуществ, ограничений и применимости в измерительных задачах.

1. Постановка цели и задачи исследования

Целью исследования является систематизация и сравнительный анализ существующих методов калибровки и совмещения результатов 2D-лазерного сканирования с цифровыми изображениями.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить особенности и классифицировать существующие способы установления соответствия между элементами цифрового изображения и данными лазерного сканирования;
- выявить критерий сравнения рассматриваемых способов;
- сравнить рассмотренные методы, определить их преимущества, ограничения и применимость в измерительных задачах.

2. Общий подход к установлению соответствия данных цифровой камеры и лазерного сканера

При проведении аналитического этапа необходимо изучить совместную калибровку цифровой камеры и 2D-лазерного сканера или 3D- лазерного сканера, обеспечив приведение цифрового изображения и данных лазерного сканирования к единой системе координат.

Методы формирования соответствий можно классифицировать по виду применяемого калибровочного образца и геометрическим признакам, которые определяются на цифровом изображении и в данных лазерного сканирования. Наиболее распространёнными являются пластины с отверстиями, шахматные доски, многоплоскостные и сферические образцы. Отдельную группу составляют комбинированные конструкции, содержащие признаки нескольких типов.

Во-первых, на основании сравнительного анализа существующих методов требуется выбрать оптимальную геометрию калибровочного образца (КО).

Во-вторых, необходимо разработать экспериментальный макет, обеспечивающий размещение КО одновременно в поле зрения камеры и рабочей области 2D-лазерного сканера. Образец независимо регистрируется обоими устройствами, после чего на изображении и в данных сканирования выделяются его характерные точки, линии или поверхности. Далее устанавливается, какие из найденных признаков относятся к одним и тем же физическим элементам образца. На основании сформированных соответствий рассчитывается математическое преобразование, связывающее системы координат камеры и сканера.

3. Существующие способы установления соответствия

Калибровка с применением ArUco-маркеров.

В работах [1, 2] для установления соответствий применяются плоские калибровочные объекты с искусственными признаками. ArUco-маркеры используются для автоматического определения положения объекта и его характерных точек на цифровых изображениях. В данных лазерного сканирования положение объекта определяется по его геометрической форме, а в работе [2] дополнительно используются отдельные светоотражающие метки, выделяемые по высокой интенсивности отражённого лазерного сигнала. Положение визуальных и светоотражающих элементов относительно границ калибровочного объекта заранее известно, что позволяет сопоставить результаты, полученные камерой и лазерным сканером.

Связь между системами координат задаётся пространственным преобразованием, включающим поворот и смещение. В работе [1] положение калибровочного щита относительно камеры определяется с помощью алгоритма PnP. Границы щита в облаке точек аппроксимируются методом RANSAC, начальная оценка преобразования рассчитывается методом Кабша, а затем уточняется методом Нелдера – Мида [1]. После определения преобразования точки лазерного сканирования переводятся в систему координат камеры и могут быть спроецированы на цифровое изображение.

В [1] показано, что увеличение количества ArUco-маркеров, кадров и положений калибровочного щита уменьшает разброс ошибок. Авторы не приводят одного итогового численного значения погрешности калибровки на реальных данных, однако отмечают, что достигнутая точность сопоставима с погрешностью используемого сканера, равной ± 2 см. Поэтому значение ± 2 см характеризует прежде всего точность лазерных измерений [1]. В работе [2] начальное взаимное положение камеры и сканера определяется с помощью алгоритма P3P. Для реальных данных после уточнения параметров при использовании двенадцати положений калибровочного щита ошибка смещения составила 0,006 м, а ошибка репроекции – 3,252 пикселя. При использовании восьми положений эти значения составили 0,017 м и 2,441 пикселя соответственно [2].

Калибровка с использованием шахматных образцов.

В работе [3] используется калибровочный образец, состоящий из двух перпендикулярных пластин с шахматным рисунком. Камера находит углы клеток и по ним определяет положение образца. Лазерный сканер не распознаёт шахматный рисунок, а регистрирует геометрическую форму пластин. По изломам лазерного профиля определяются три контрольные точки, каждая из которых сопоставляется с соответствующей линией калибровочного образца. Затем рассчитываются параметры поворота и смещения между системами координат камеры и сканера. Сначала получают начальное линейное решение, после чего уточняют его методом нелинейной оптимизации, уменьшая расстояние между точками сканера и соответствующими линиями. Среднее пространственное расстояние между контрольными точками, определёнными камерой и сканером на расстоянии 0,5 м для трех положений образца, после преобразования координат в среднем составило 11 мм [3].

В работе [4] применяется плоская шахматная доска, которую последовательно устанавливают в нескольких положениях. Камера распознаёт углы клеток и определяет положение плоскости доски в пространстве. Лазерный сканер регистрирует точки, расположенные на поверхности этой же доски. Таким образом, общим элементом для камеры и сканера является не отдельная характерная точка, а плоскость калибровочного образца. После преобразования координат точки лазерного сканирования должны располагаться на плоскости, положение которой определено по цифровому изображению. Связь между системами координат задаётся матрицей поворота и вектором смещения. На реальных данных средняя остаточная ошибка совмещения, определённая как перпендикулярное расстояние от преобразованных точек сканера до плоскости калибровочного образца, составила 20–30 мм [4].

Калибровка с использованием сферического образца.

В работе [5] для калибровки используются не менее четырёх сфер. В облаке точек определяется поверхность каждой сферы и рассчитывается координаты её центра, на изображении находится контур сферы в виде эллипса, по которому с учётом *известного радиуса* вычисляется положение её центра относительно камеры. Затем центры одних и тех же сфер сопоставляются, а между системами координат камеры и лазерного сканера рассчитываются поворот и смещение. В моделировании на расстоянии 15–20 м ошибка определения центра сферы по изображению составила около 32 мм [5].

Калибровочные пластины с отверстиями.

В работе [6] используется плоская калибровочная пластина с шахматным рисунком и четырьмя круглыми отверстиями. По углам шахматного рисунка определяются внутренние параметры камеры и положение пластины относительно неё. В облаке точек сначала выделяется плоскость калибровочного образца, после чего с ней сопоставляется геометрическая модель пластины и рассчитываются трёхмерные координаты центров отверстий, полученные центры проецируются на изображение. В реальном

эксперименте средняя ошибка проецирования центров отверстий составила 1,104 пикселя [6].

В работе [7] применяется плоская пластина с треугольным отверстием и шахматными элементами, используемыми для определения её положения относительно камеры. Плоскость лазерного сканирования направляется через треугольное отверстие, вследствие чего в лазерном профиле возникают характерные разрывы. По их расположению определяется положение линии сканирования на поверхности пластины. На найденной линии выбираются контрольные точки, координаты которых рассчитываются в системах координат камеры и лазерного сканера. На основании полученных соответствий «точка – точка» вычисляются поворот и смещение между устройствами. Для калибровки достаточно двух положений пластины. Среднее пространственное расстояние между контрольными точками, определёнными камерой и сканером после преобразования координат, составило 26,3 мм. Среднее перпендикулярное расстояние от преобразованных точек сканера до плоскости образца составило 8,8 мм [7].

Выводы

Проведённый анализ показал, что задача совместной калибровки цифровой камеры и лазерного сканера является актуальной и в настоящее время наиболее широко рассматривается в области робототехники и автономной навигации. При этом требования к точности совмещения данных в подобных системах, как правило, ниже, чем в измерительных задачах, связанных с определением геометрических параметров малоразмерных объектов. В исследовании оценивались преимущественно абсолютные значения погрешности, поскольку именно в таком виде результаты представлены в рассматриваемых публикациях.

Наиболее близкими к рассматриваемой измерительной системе являются метод Kim J.-Y. и Ha J.-E., представленный в работе «Automatic Extrinsic Calibration of a Camera and a 2D LiDAR With Point-Line Correspondences» [3], и метод Ha J.-E., представленный в работе «Extrinsic Calibration of a Camera and Laser Range Finder Using a New Calibration Structure of a Plane with a Triangular Hole» [7], непосредственно использующие данные 2D-лазерного сканирования. В работе Kim J.-Y. и Ha J.-E. [3] на расстоянии 0,5 м средняя пространственная погрешность составила около 11 мм. В работе Ha J.-E. [7] среднее расстояние между соответствующими трёхмерными точками составило 26,3 мм, а среднее расстояние от преобразованных точек сканера до плоскости калибровочного образца – 8,8 мм. Расстояние до образца в работе Ha J.-E. [7] авторами не указано.

В качестве перспективного направления предложена разработка жёсткого многоплоскостного калибровочного образца с круглыми сквозными отверстиями, несимметрично расположенными на непараллельных поверхностях. Такая конструкция объединяет преимущества многоплоскостных

образцов [3], методов определения центров геометрических элементов [5, 6] и регистрации отверстий средствами 2D-лазерного сканирования [7]. Предполагается, что её применение позволит повысить устойчивость калибровки и обеспечить более точное совмещение цифровых изображений с данными лазерного сканирования. Эффективность предложенного решения должна быть подтверждена экспериментально.

Список литературы

1. Абраменко А. А. Калибровка взаимного расположения стереокамеры и трёхмерного сканирующего лазерного дальномера // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 2. – С. 220–230.
2. Блохинов Ю. Б., Андриенко Е. Э., Казахмедов К. К., Вишняков Б. В. Автоматическая калибровка системы видеокамер и лидаров для автономных мобильных комплексов // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 3. – С. 382–393.
3. Kim J.-Y., Ha J.-E. Automatic Extrinsic Calibration of a Camera and a 2D LiDAR With Point-Line Correspondences // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 76904–76912. – DOI 10.1109/ACCESS.2023.3298055.
4. Pless R., Zhang Q. Extrinsic Calibration of a Camera and Laser Range Finder. – St. Louis : Washington University in St. Louis, Department of Computer Science and Engineering, 2003. – Technical Report WUCSE-2003-58.
5. Tóth T., Pusztai Z., Hajder L. Automatic LiDAR-Camera Calibration of Extrinsic Parameters Using a Spherical Target // 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2020. – P. 8580–8586.
6. Yan G., He F., Shi C., Wei P., Cai X., Li Y. Joint Camera Intrinsic and LiDAR-Camera Extrinsic Calibration // arXiv. – 2023. – arXiv:2202.13708.
7. Ha J.-E. Extrinsic Calibration of a Camera and Laser Range Finder Using a New Calibration Structure of a Plane with a Triangular Hole // International Journal of Control, Automation, and Systems. – 2012. – Vol. 10, no. 6. – P. 1240–1244. – DOI 10.1007/s12555-012-0619-7.
8. Бабаева Л. Н. Проблемы и практический опыт оптимизации процессов капиллярного и магнитопорошкового контроля // International Conference on Aviation Motors – ICAM 2020: материалы Международной научно-технической конференции. – Москва, 2020.

Контакты:

s255040@pers.spmi.ru (Никитина Ольга Артемовна);
slavaklenin@mail.ru (Кленин Владислав Леонидович);
kio@activetest.ru (Котовщиков Илья Олегович).