

# МОБИЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ 3D-СКАНИРОВАНИЯ СРЕДНЕГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ

**СЕРГЕЙ БЫКОВСКИЙ** sergei\_bykovskii@corp.ifmo.ru

**ПАВЕЛ КУСТАРЁВ** kustarev@corp.ifmo.ru

**ЕВГЕНИЙ ДИДИН** didin.evgenii@gmail.com

**ВЛАДИМИР ГРОМОВ** gromov@vladimir.one

**АЛЕКСАНДР ДРАНИЦА** dranitsaal@gmail.com

Сегодня мобильные системы 3D-сканирования используются для самых разных задач: исследования объектов, их реверс-инжиниринга, оценки состояния и моделирования в археологии, промышленном дизайне, ювелирном деле, медицине, геологии, строительстве, кино, игровой индустрии и многих других сферах. В статье рассмотрены виды 3D-сканеров, их структура и комплекс мультисенсорного технического зрения, разработанный в Университете ИТМО.

## ВВЕДЕНИЕ

Существующие 3D-сканеры можно разделить на три класса по размерам рабочей области сканирования.

В первый класс входят устройства малого радиуса действия, предназначенные для локального сканирования объектов с высокой точностью. К ним относятся ручные сканеры (например, фирмы Artec, рис. 1а) и платформы для 3D-сканирования — в частности, от Shining 3D (рис. 1б). Подобные устройства позволяют проводить сканирование области в несколько десятков сантиметров (обычно 20–30 см) и имеют стои-

мость в диапазоне 60–500 тыс. руб. При работе с крупногабаритными объектами необходимо производить несколько локальных измерений, а потом их совмещать. Точность сканирования у наиболее дорогостоящих устройств данного класса составляет 50–100 мкм. Чаще всего в таких сканерах используют камеры совместно с источником направленного света (лазером), либо проектором структурированного света.

Ко второму классу относятся 3D-сканеры ближнего радиуса действия. Обычно такое оборудование используется для сканирования

частей помещений, памятников, деталей механизмов, людей, а также для моделирования персонажей в игровой индустрии и кино. Примерами таких сканеров являются продукция компании RangeVision (рис. 2), игровой сенсор Kinect от Microsoft и др.

Рабочее расстояние таких сканеров составляет 1–2 метра, диапазон цен — от 9 до 300 тыс. руб. Более дорогостоящие устройства позволяют достигать точность до 100 мкм. В большинстве 3D-сканеров данного класса в качестве датчиков используются камера и проектор структурированного света.

**РИС. 1. ▼**

а) Ручной 3D-сканер Artec Eva; б) платформа Shining 3D EinScan SE



Третий класс включает промышленные 3D-сканеры дальнего радиуса действия, предназначенные для формирования компьютерных моделей крупных архитектурных объектов, таких как здания, мосты и др. Данные устройства имеют точность 1–2 мм, позволяют производить сканирование на расстоянии 100–200 метров и используют дорогостоящие лазерные дальномеры. Стоимость таких сканеров составляет от 3 до 6 млн руб. В качестве примера можно привести продукцию компании Leica — например, 3D-сканер Leica ScanStation P40 (рис. 3).

Интересно отметить, что сегодня на рынке 3D-сканеров практически нет устройств, рассчитанных на средний размер рабочей области (до 40–50 м). Для сканирования в среднеразмерном диапазоне можно использовать сканеры дальнего радиуса действия, но это слишком дорогое решение. Обычно для таких задач применяют сканер ближнего действия, производя множество циклов измерения вблизи сканируемых объектов и затем объединяя результаты в единую 3D-модель.

Использование сканеров средней дальности актуально для дизайна интерьера, рынка недвижимости, квартирных строительных работ и других сфер, где нужна средняя точность измерений (порядка 1 см), но при этом важны скорость измерений, носимость и низкая стоимость оборудования.

**ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА  
3D-СКАНЕРОВ СРЕДНЕГО  
РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ**

Дорогостоящие сканеры, работающие на расстоянии до 100 метров, либо используют для оценки расстояния только точный лазерный дальномер, либо совмещают обработку данных с камер видимого диапазона и лазерного дальномера. При этом дальномер позволяет проводить измерения на большом расстоянии даже в условиях плохой освещенности, а с помощью камер можно получить информацию о цвете и текстуре объектов, а также уточнить данные о расстояниях на ближних дистанциях (до 5 метров). Совместная обработка (sensor fusion) мультисенсорных данных с камер и лазерного дальномера — лидара — дает возможность получить более качественные результаты.



**РИС. 2.** ◀  
3D-сканер  
Range Vision Spectrum

В последнее время на рынке появились лазерные дальномеры со сравнительно низкой стоимостью и приемлемой точностью. Лидером рынка в ценовом диапазоне 9–15 тыс. руб. является дальномер LIDAR-Lite v3 фирмы Garmin (рис. 4а). На базе этого дальномера также реализован лазер-сканер Sweep V1 (рис. 4б) фирмы Scanse.

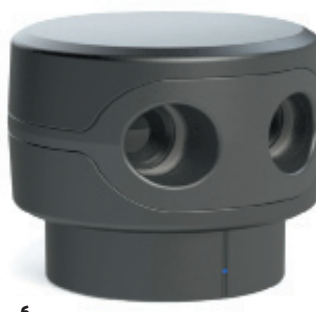
Данные устройства позволяют выполнять сканирование пространства на расстоянии от 1,5 до 40 м с точностью до 2,5 см. Дополнив систему сканера цифровой камерой, можно уточнить данные о расстояниях в ближнем радиусе действия и получить данные о цвете и текстуре объекта. Стоимость камер с разрешением 5–8 Мпикс для данной задачи (например, Raspberry Pi Camera v2 на базе 8 Мпикс сенсора Sony IMX219) составляет 2–3 тыс. руб.

**ТРЕБОВАНИЯ  
К ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ  
ПЛАТФОРМЕ 3D-СКАНЕРОВ**

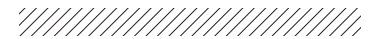
С ростом производительности встроенных вычислителей вста-

ет вопрос о выполнении некоторых задач построения 3D-модели на вычислительных ресурсах самого сканера. Это позволит уменьшить объем данных, передаваемых на вспомогательный компьютер или в облако, и увеличить скорость сканирования. В идеале сканер должен стать полностью автономным

**РИС. 3.** ▼  
Промышленный  
3D-сканер  
Leica ScanStation P40



**РИС. 4.** ◀  
а) Лидар LIDAR-Lite v3  
фирмы Garmin;  
б) лидар-сканер Sweep V1



устройством, подобно обычному цифровому фотоаппарату.

Выполним оценку сложности вычислений и требований к встроенному компьютеру. Весь процесс обработки данных с камер и лидара в составе 3D-сканера можно разделить на две части:

1. расчет облака точек по карте диспаратета, где каждая точка ассоциирована с пикселем изображения и расстоянием до него в метрических координатах;
2. построение полигональной модели из полученного облака точек.

Сегодня активно ведутся работы по переносу первого этапа на встроенные вычислители с ограниченной производительностью. Например, в работе [1] рассматривается решение данной задачи с помощью GPU Nvidia Tegra K1 с производительностью 360 GFLOPS, которая позволяет выполнять обработку изображений с разрешением 320×240 пикселей со скоростью 12 кадров/с. А в [2] представлена реализация на Nvidia Tegra X1 с 1024 GFLOPS и скоростью обработки изображений 640×480 пикселей, равной 81 кадр/с.

В качестве метода ускорения вычислений часто рассматривают аппаратную реализацию некоторых или всех функций обработки объемных моделей. В частности, на микросхемах ПЛИС бюджетной серии Xilinx Artix-7 (XC7A100T) [3]

можно производить обработку изображений 640×480 пикселей со скоростью 60 кадров/с. А в [4] авторы описывают, как ПЛИС средней ценовой категории Xilinx Kintex-7 (XC7K325T) позволяет обрабатывать изображения уже с разрешением 1280×720 пикселей со скоростью 60 кадров/с. В целом современные исследования направлены в сторону поиска наиболее высокопроизводительной и энергоэффективной платформы.

Второй этап формирования 3D-модели — построение полигональной сетки по облаку точек — наиболее ресурсоемкий. В настоящее время его встроенная реализация является остро актуальной, но очень сложной задачей. Пока ведутся исследования и тестируются опытные образцы, на практике для этого этапа используют мощные настольные и серверные системы на высокопроизводительных процессорах серий Intel Core, Intel Xeon, AMD Athlon, AMD Opteron, а также видеопроцессоры серий NVIDIA GeForce GTX, NVIDIA Tesla, NVIDIA Quadro, AMD FirePro и т. п. При этом скорость построения полигональной сетки в среднем составляет 5 кадров/с.

Сегодня перспективными встраиваемыми компьютерными платформами для реализации функций 3D-сканера являются неоднородные (гетерогенные) вычислители, имеющие в своем составе:

- для основного объема обработки 3D-моделей — GPU для встраиваемых/мобильных применений и программируемую логику (ПЛИС) FPGA;
- для реализации вспомогательных функций 3D-реконструкции, задач финальной обработки построенных моделей объектов, системных интерфейсных и коммуникационных функций прибора — специализированные сопроцессоры обработки «стандартных» мультимедиаданных, а также несколько ядер процессоров общего назначения.

Следует отметить, что встроенная реализация трехмерного технического зрения — как в части конкретных «тяжелых» функций (например, построение полигональной модели), так и в комплексе — является активно развивающейся областью. А значит, необходима специальная аппаратно-программная база для проектирования и испытаний. Для этого не удастся обойтись популяр-

ными и доступными полупроводниками типа встраиваемых микрокомпьютеров Raspberry Pi (или иными похожими) с подключенными датчиками, поскольку они не отвечают требованиям, сформулированным выше. Требуется разработка специальных инструментальных платформ. Далее в статье представлен пример подходящего оборудования, разработанный в Университете ИТМО (Санкт-Петербург).

### ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МУЛЬТИСЕНСОРНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

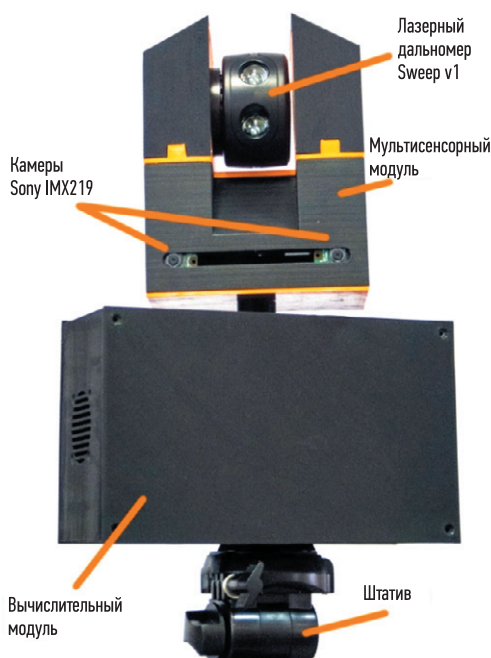
Инструментальная платформа технического трехмерного зрения «КМТЗ», разработанная на кафедре вычислительной техники Университета ИТМО, реализует концепцию сенсорной и вычислительной неоднородности и слияния. В ее состав входят несколько видеокамер, лидар, поворотная механика измерительной головки и встроенный многопроцессорный вычислительный модуль.

Комплекс предназначен для исследования, отработки, а также пробной реализации алгоритмов и прототипирования аппаратуры систем технического зрения. Приоритетными, но не единственными, направлениями исследований для данного оборудования являются:

- мультисенсорное (sensor fusion) сканирование сцен с углом обзора 360°;
- формирование компьютерных 3D-моделей (например, в формате PLY);
- организация хранения и передачи данных системы 3D-зрения в смежные системы;
- реализация робототехнических и других киберфизических комплексов с техническим зрением.

В рамках проекта разрабатывается открытая программная библиотека, которая базируется на адаптированном программном обеспечении с открытым доступом и реализует ключевые функции 3D-зрения. С ее помощью проектировщики прикладных систем (роботов, автономных подвижных средств и т. д.) могут не погружаться в низкоуровневые детали работы с оборудованием в рамках 3D-сканирования и компьютерной реконструкции объектов, но при этом гибко адаптировать необходимую функциональность под свои задачи.

РИС. 5. ▽  
Общий вид  
оборудования «КМТЗ»



Состав оборудования «КМТЗ» представлен на рис. 5.

Основные технические характеристики комплекса:

- радиус сканирования — 40 м;
- разрешающая способность — 10 мм;
- погрешность оценки линейных дистанций — 25 мм;
- габариты — 200×80×283 мм;
- энергопотребление — 28 Вт.

Все компоненты инструментальной платформы можно отнести к классу «бюджетных». Это позволяет переносить отработанные прототипы систем 3D-зрения на недорогую аппаратуру, что критически важно при разработке устройств и систем для широкого потребительского рынка. В комплексе используются следующие компоненты:

- Сенсоры:
  - камера Sony IMX219 8 Мпикс (3280×2464);
  - лазерный дальномер (лидар) Sweep v1;
- Вычислительное ядро:
  - процессор ARM Cortex-A9, 2 ядра;
  - процессор ARM Cortex-A15, 4 ядра;
  - графический процессор Kepler с 192 ядрами CUDA (NVIDIA);
  - ПЛИС Artix-7 (28 тыс. прог. ячеек).

Структурная схема комплекса представлена на рис. 6.

Встроенная электроника состоит из двух плат: ZynqBerry (TE0726-03M) и Ixora Carrier Board V1.1A с подключенной платой расширения Apalis TK1 V1.1A.

Модуль ZynqBerry построен на базе системы на кристалле Zynq-7000 (Xilinx). Он отвечает за сбор и обработку данных с лидара и двух камер, т. е. выступает в качестве основного вычислительного ядра системы. Камеры и лидар подключены непосредственно к модулю, а на плате установлены схемы интерфейсных адаптеров. Также к плате подсоединен модуль связи Wi-Fi ASUS USB-N10 Nano, обеспечивающий поддержку беспроводного взаимодействия с персональным компьютером (ПК) для диагностики и конфигурирования, а также передачи данных с камер и лидара для дальнейшей обработки.

Модуль Ixora Carrier Board с платой расширения Apalis TK1 используется в качестве дополнительного высоко-

производительного вычислителя. В его состав входит мобильный процессор Nvidia Tegra K1, включающий 4-ядерный процессор ARM Cortex-A15 и 192 ядра NVIDIA CUDA с производительностью 360 GFLOPS. Данное вычислительное ядро можно использовать для выполнения встроенных алгоритмов 3D-реконструкции на базе данных с камер и лидара. К плате Ixora Carrier Board также подключен Wi-Fi адаптер ASUS USB-N10 Nano для поддержки беспроводного канала к плате ZynqBerry и ПК оператора.

Инструментальная платформа «КМТЗ» развивается по мере решения конкретных прикладных задач на ее базе. Каждый новый исследовательский или опытно-конструкторский проект расширяет программно-аппаратный базис функций 3D-зрения. В настоящее время идут работы по созданию полноценных фреймворков для таких прикладных областей, как:

- техническое зрение роботов;
- 3D-сканирование помещений и зданий (моделирование, измерение, оценка состояния);
- 3D-сканирование физических объектов (деталей, конструктивных узлов, предметов и т. п.).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодня 3D-сканирование находится в стадии роста и расширения: как в части реальных разработок и практического применения, так и в сфере научных исследований. Анализ состояния рынка показывает, что заполнены

еще не все ниши. Например, наблюдается недостаток 3D-сканеров среднего радиуса действия с возможностью сканирования на расстояниях до 50 м — для задач моделирования помещений и удаленных объектов средних габаритов. До последнего времени это было обусловлено техническими и технологическими ограничениями, но новая вычислительная аппаратура — мобильные GPU и программируемая логика больших объемов — уже сейчас открывают дорогу эффективным и недорогим решениям.

Ожидается, что в течение ближайших 5–10 лет в этой области (как, впрочем, и в сфере трехмерного технического зрения в целом) возникнет много новых подходов и разработок. У российских исследователей и производителей имеется реальная возможность двигаться в авангарде этого процесса. ●

### ЛИТЕРАТУРА

1. Schopsa T., Sattlera T., Haneb C., Pollefeys M. Large-Scale Outdoor 3D Reconstruction on a Mobile Device // Computer Vision and Image Understanding. 2016.
2. Hernandez-Juarez D., Chacon A., Espinosa A., Vazquez D., Moure J. C., Lopez A. M. Embedded real-time stereo estimation via Semi-Global Matching on the GPU // Procedia Computer Science. 2016. Vol. 80.
3. Oleynikova H., Honegger D., Pollefeys M. Reactive Avoidance Using Embedded Stereo Vision for MAV Flight // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2015.
4. Ttofis C., Kyriakou C., Theodoridis T. A Low-Cost Real-Time Embedded Stereo Vision System for Accurate Disparity Estimation Based on Guided Image Filtering // IEEE Transactions on Computers. 2016. Vol. 65. № 9.

Рис. 6. ▼ Структурная схема оборудования «КМТЗ»

