

Виртуальная реальность

Хотя под точным определением виртуальной реальности обычно понимают полную замену аудиовизуальных эффектов реального мира виртуальными, в более повседневном понимании под этим понимается любое сочетание виртуальных элементов с реальными. Чтобы точнее определить виртуальную реальность, ее зачастую разделяют на дополненную реальность (augmented reality, AR), смешанную реальность (mixed reality, MR) и собственно виртуальную реальность (virtual reality, VR). Чтобы избежать неопределенности терминов, более широкое понимание виртуальной реальности называют расширенной реальностью (extended reality), которая объединяет все перечисленные классы. Остановимся подробнее конкретно на VR.

Что делает: виртуальная реальность основана на создании компьютерных звуков и изображений. Она полностью отделяет пользователя от реальной реальности (RR) с помощью VR-шлема, наушников, джойстиков и заменяет её симуляцией. Термин «виртуальный» происходит от лат. *virtualis* — возможный.

Примеры реализаций: Oculus Rift, NASA Hybrid Reality Lab, Pilot Training Next.

Отдельно стоит отметить такую область применения виртуальной реальности, как организация полного группового погружения на игровом полигоне.

Виртуальная реальность (VR, англ. *virtual reality*, VR, искусственная реальность) — созданный техническими средствами мир, передаваемый человеку через его ощущения: зрение, слух, осязание и другие. Виртуальная реальность имитирует как воздействие, так и реакции на воздействие. Для создания убедительного комплекса ощущений реальности компьютерный

синтез свойств и реакций виртуальной реальности производится в реальном времени.

Объекты виртуальной реальности обычно ведут себя близко к поведению аналогичных объектов материальной реальности. Пользователь может воздействовать на эти объекты в согласии с реальными законами физики (гравитация, свойства воды, столкновение с предметами, отражение и т. п.). Однако, часто в развлекательных целях пользователям виртуальных миров позволяется больше, чем возможно в реальной жизни (например: летать, создавать любые предметы и т. п.).

Не следует путать виртуальную реальность с дополненной. Их коренное различие в том, что виртуальная конструирует новый искусственный мир, а дополненная реальность лишь вносит отдельные искусственные элементы в восприятие мира реального.

Технические задачи, которые решаются при обеспечении погружения в виртуальную реальность:

- Трансляция изображения:
 - Шлемы виртуальной реальности;
 - MotionParallax3D-дисплеи;
 - Виртуальный ретинальный монитор;
- Трансляция звука;
- Имитация тактильных ощущений:
 - Leap Motion;
 - Перчатки;
 - Контроллеры;
- Трекинг:
 - Оптический;

- Ультразвуковой.

На рис. 3 показана эволюция развития и существующие реалии VR.

Несмотря на наличие классификации для определения конкретного типа «реальности», также существует и классификация по типам внутри понятия виртуальной реальности.

Пассивная виртуальная реальность (passive virtual reality) — автономное графическое изображение и его звуковое сопровождение, не управляемые человеком.

Обследуемая виртуальная реальность (exploratory virtual reality) — возможность выбора вариантов сценариев изображения и звука, предоставляемых пользователям в ограниченном количестве.

Интерактивная виртуальная реальность (interactive virtual reality) — виртуальная среда, которой пользователь может сам управлять и манипулировать по законам синтезированного мира с помощью специальных устройств, обладающих функцией трекинга.

Трекинг в виртуальной реальности — это особая технология, лежащая в основе взаимодействия человека с виртуальным миром. Она направлена на точное определение координат и позиции реального объекта (например, руки, головы или устройства) в виртуальной среде с помощью трех координат (x , y , z) его расположения и трех углов (α , β , γ), задающих его ориентацию в пространстве.

Области применения виртуальной реальности

Виртуальная реальность находит себе все более широкое применение. Несмотря на то, что изначальный толчок развития VR получила от игровой индустрии, в последние годы VR нашла себе применение в таких областях как медицина, военное дело и космонавтика. Ниже подробнее описаны различные сферы применения дополненной реальности.

1. **Развлекательная сфера** (игры, аудио- и видеоматериалы развлекательного характера).

Говоря о VR в развлекательной сфере, стоит отметить, что многие технологии, создававшиеся исключительно для развлечений, приобретают более широкое распространение: так, например, Unreal Engine – игровой движок симуляции физической среды – был принят на использование в NASA Hybrid Reality Lab, а шлем Oculus VR используется в стартапе Oxford Medical Simulation.

Говоря о применении виртуальной реальности в сфере развлечений, нельзя не упомянуть относительно новую тенденцию — возникновение виртуальных полигонов, на которых желающим предлагается сыграть в игру с повышенным уровнем погружения в виртуальный мир. Для достижения необходимого уровня погружения необходимо обеспечить:

- Достаточно крупное пустое закрытое пространство (например, на одном из таких полигонов рабочая площадь примерно равна 400 м²)
- Автономный комплекс, состоящий из компьютера с беспроводным сетевым адаптером, шлема виртуальной реальности, наушников, контроллеров
- Клиент-серверное приложение (видеоигра), адаптированное для подключения нескольких участников и работы с виртуальной реальностью
- Сетевая инфраструктура для синхронизации погружения участников
- Сервер, обслуживающий данные, получаемые с клиентов, установленных на автономных комплексах (о перемещениях контроллеров участников, их позиций, взаимодействия с игровым окружением).

В одном из примеров реализаций такого концепта используется подход в создании “истории”, внутри которой оказываются участники, и по которой должны продвигаться в процессе геймплея. Так, игроки начинают в игре на

космической базе, по которой им нужно передвигаться между комнатами и отсеками, при этом передвижение осуществляется как физически (игроки перемещаются по полигону в реальном мире), так и виртуально (на них проецируется виртуальное тело, которое синхронизировано в положении с реальным — положение в пространстве, ноги, руки, поворот туловища и головы, контроллер в форме оружия). В качестве цели выступает достижение последней по сюжету комнаты, при этом на персонажей нападают компьютерные противники, с которыми им приходится сражаться при помощи виртуального оружия. Полное погружение и синхронизация достигается за очень короткие сроки, буквально за 10-15 минут игры.

В другой реализации установлены схожие правила, но при этом игроки сражаются уже друг с другом, что дополнительно добавляет интерактивности происходящему. Для синхронизации виртуального тела с реальным игрокам предлагается надеть на себя специальные маркеры для трекинга: маркеры на руки (уникальные для левой и правой руки), на ноги, контроллер в виде автомата (аналогично его виртуальной копии), и собственно сам шлем виртуальной реальности.

2. Медицина (тренировка медицинского персонала в VR).

Применение VR в медицине имеет удивительно длинную историю: первые попытки внедрения VR были предприняты еще в 1990х с адаптацией «первой стереоскопической 3D-платформы» игровой платформы Nintendo Virtual Boy для тренировки медицинского персонала, однако эти попытки не увенчались успехом. В последние годы, однако, использование VR в медицинском образовании существенно возросло, хотя и не имеет такого широкого применения как в космонавтике или развлекательной сфере. Среди сотен медицинских VR стартапов можно выделить Oxford Medical Simulation, позволяющий подготовить медицинский персонал к проведению операций с использованием Oculus VR и ArchVirtual, на данный момент активно интегрирующийся в медицинское обучение в

Университете Торонто. Еще одной активно развивающейся областью применения VR в медицине является сфера облегчения страданий тяжело больным людям, которым VR позволят продолжать испытывать мир будучи прикованным к постели. Многочисленные стартапы (Psious. Virtually Better, Bravemind и пр.) также используют виртуальную реальность для лечения психических расстройств – от фобий до ПТСР.

3. Спорт

Одним из несколько неожиданных применений виртуальной реальности оказался спорт. Так стартап STRIVR Labs позволяет испытать мир глазами, например, игрока в футбол, что позволяет тренеру более детально анализировать игры. Стартап привлек внимание 23 профессиональных команд по американскому футболу.

4. Военная сфера

Виртуальная реальность нашла применение и в военном деле, где ее используют для тренировки пилотов и машинистов. Так, например, британская программа Training Pilot Next на данный момент внедряется в Королевские военно-воздушные силы Великобритании для тренировки пилотов самолетов F-35, F-15E, F-16, C-17 и других.

5. Космонавтика

Как область с наибольшими препятствиями к тренировке персонала в реальной среде, космонавтика активно пользуется развивающимся VR. Одним из наиболее видных применений VR в космонавтике является NASA Hybrid Reality Lab (лаборатория смешанной реальности NASA). Опубликовав статью и презентацию о своих технологиях в 2017м году, NASA показали перспективы применения VR в подготовке космонавтов: от тренировки внутри точной модели МКС с виртуальными репликантами использующихся в космосе инструментов до полной и точной симуляции задач, требующих от космонавта выхода в открытый космос, что в сочетании с уже имеющимися

технологиями симуляции невесомости позволяет доработать до автоматизма поведение космонавтов во всех возможных сценариях.

6. Обучение

Сегодня интерактивная реальность позволяет смоделировать тренировочную среду в тех сферах и для тех занятий, для которых необходимой и важной является предварительная подготовка. Как пример, это может быть операция, управление техникой и другие сферы. Существует доказанный факт эффективности обучения в VR. В Китае было проведено исследование с двумя группами школьников. Одна из них училась по учебникам, вторая — в VR. Успеваемость второй группы сразу после прохождения материала была на 20 % выше, а спустя 2 недели — на 15 %.

Виртуальная реальность имеет свои достоинства и недостатки. К достоинствам относятся:

- возможность визуализации различных объектов и физических явлений;
- возможность полностью окунуться в интерактивное измерение;
- получение новых эмоций и профилактика стресса;
- создание электронных информационных и обучающих ресурсов и проведение конференций;
- создание объектов культурного наследия.
- возможность для каждого перейти на новый уровень развлечений.

К недостаткам можно отнести следующие моменты:

- высокая стоимость устройств;
- психологическое воздействие на человека — погружение в виртуальный мир иногда влечет за собой проблемы в различных сферах жизни.

Обзор методов и технологий отслеживания положения для виртуальной реальности.

Отслеживание положения (positional tracking) представляет собой сочетание аппаратных средств и программного обеспечения, которое позволяет определить абсолютное положение объекта в пространстве. Данная технология является критически важной для достижения эффекта погружения в виртуальную реальность. В сочетании с отслеживанием ориентации становится возможным измерять и передавать в ВР все 6 степеней свободы (6-DoF) реального мира. В ходе работы с технологиями виртуальной реальности в нашей компании мы получили определенный опыт в данном вопросе и хотели бы им поделиться, рассказав про существующие способы отслеживания положения для виртуальной реальности, а также о плюсах и минусах того или иного решения.

Совокупность методов и подходов к решению данной задачи можно поделить на несколько групп:

- Акустические
- Радиочастотные
- Магнитные
- Оптические
- Инерциальные
- Гибридные

Человеческое восприятие предъявляет высокие требования к точности (~1мм) и задержкам (< 20 мс) в ВР оборудовании. Оптические и инерционные методы наиболее близки к данным требованиям, и чаще всего используются совместно, дополняя друг друга. Рассмотрим базовые принципы, на которых построены вышеперечисленные методы.

Акустические методы

Акустические приборы слежения используют ультразвуковые (высокочастотные) звуковые волны для измерения положения и ориентации целевого объекта. Для определения положения объекта измеряется время пролёта (time-of-arrival) звуковой волны от передатчика к приёмникам, либо разность фаз синусоидальной звуковой волны при приёмо-передаче. Компания Intersense разрабатывает устройства отслеживания позиции на основе ультразвука.

Акустические трекеры, как правило, имеют низкую скорость обновления, вызванную низкой скоростью звука в воздухе. Другая проблема состоит в том, что скорость звука в воздухе зависит от таких факторов внешней среды, как температура, барометрическое давление и влажность.

Радиочастотные методы

Методов основанных на радиочастотах множество. Во многом по принципам определения положения они схожи с акустическими методами отслеживания (отличие лишь в природе волны). Наиболее перспективными на данный момент являются UWB (Ultra-Wide Band) методы, но даже в лучших решениях на основе UWB точность достигает только порядка сантиметров (DW1000 от DecaWave, Dart от Zebra Technologies, Series 7000 от Ubisense и другие). Возможно, в будущем стартапам вроде Pozyx или IndoTraq удастся достичь суб-миллиметровой точности. Однако пока UWB решения для отслеживания позиции не применимы для виртуальной реальности.

Магнитные методы

Магнитный трекинг основан на измерении интенсивности магнитного поля в различных направлениях. Как правило, в таких системах есть базовая станция, которая генерирует переменное или постоянное магнитное поле. Так как сила магнитного поля уменьшается с увеличением расстояния между точкой измерения и базовой станцией, можно определить местоположение контроллера. Если точка измерения вращается, распределение магнитного

поля изменяется по различным осям, что позволяет определить ориентацию. Наиболее известными продуктами на основе магнитного трекинга являются контроллер Razer Hydra и система STEM от компании Sixense.

Точность данного метода может быть достаточно высока в контролируемых условиях (в спецификациях Hydra говорится о 1 мм позиционной точности и 1 градусе точности ориентации), однако магнитное отслеживание подвержено помехам от токопроводящих материалов вблизи излучателя или датчика, от магнитных полей, создаваемых другими электронными устройствами и ферромагнитными материалами в пространстве отслеживания.

Оптические методы

Оптические методы представляют собой совокупность алгоритмов компьютерного зрения и отслеживающих устройств, в роли которых выступают камеры видимого или инфракрасного диапазона, стерео-камеры и камеры глубины.

В зависимости от выбора системы отсчёта выделяют два подхода для отслеживания положения:

- Outside-in подход подразумевает присутствие неподвижного внешнего наблюдателя (камера), определяющего положение движущегося объекта по характерным точкам. Используется в Oculus Rift (Constellation), PSVR, OSVR и множестве Motion Capture систем.
- Inside-out подход предполагает наличие на движущемся объекте оптического сенсора, благодаря которому возможно отслеживать движение относительно неподвижных точек в окружающем пространстве. Используется в Microsoft HoloLens, Project Tango (SLAM), SteamVR Lighthouse (гибридный вариант, т.к. есть базовые станции).

Также в зависимости от наличия специальных оптических маркеров выделяют отдельно:

- **Безмаркерный трекинг** как правило строится на сложных алгоритмах с использованием двух и более камер, либо стерео камер с сенсорами глубины.
- **Трекинг с использованием маркеров** предполагает заранее заданную модель объекта, которую можно отслеживать даже с одной камерой. Маркерами обычно служат источники инфракрасного излучения (как активные, так и пассивные), а также видимые маркеры наподобие QR-кодов. Такой вид трекинга возможен только в пределах прямой видимости маркера.

Задача Perspective-n-Point (PnP)

При оптическом отслеживании для определения положения объекта в пространстве решается так называемая задача PnP (Perspective-n-Point), когда по перспективной проекции объекта на плоскость сенсора камеры необходимо определить положение объекта в 3D-пространстве.

Для заданной 3D-модели объекта и 2D-проекции объекта на плоскость камеры решается система уравнений. В результате чего получается множество возможных решений. Количество решений зависит от числа точек в 3D-модели объекта. Однозначное решение для определения 6-DoF положения объекта можно получить как минимум при 4 точках. Для треугольника получается от 2 до 4 возможных решений, то есть положение не может быть определено однозначно (на рисунке справа).

Решение предлагается достаточно большим количеством алгоритмов, реализованных в виде библиотек:

- POSIT

- posest
- OpenCV (solvePnP)

SLAM — Simultaneous Localization and Mapping

Метод одновременной локализации и построения карты (SLAM) — это наиболее популярный способ позиционирования в робототехнике (и не только), который применяется для отслеживания положения в пространстве.

Алгоритм состоит из двух частей: первая — составление карты неизвестного окружающего пространства на основе измерений (данные с одометра или стерео-камеры), вторая — определение своего местоположения (локализация) в пространстве на основе сравнения текущих измерений с имеющейся картой пространства. Данный цикл непрерывно перевычисляется, при этом результаты одного процесса участвуют в вычислениях другого процесса. Наиболее популярные методы решения задачи включают в себя фильтр частиц и расширенный фильтр Калмана. На самом деле SLAM — это довольно обширная тема, а не только один определенный алгоритм.

SLAM удобен для мобильных решений виртуальной и дополненной реальности. Однако недостатком данного подхода является большая вычислительная сложность, что в купе с требовательными VR/AR приложениями будет сильно загружать производительные ресурсы аппарата.

Project Tango от Google и Microsoft Hololens являются наиболее известными проектами на основе SLAM для мобильных устройств. Также ожидается поддержка трекинга на основе SLAM в недавно анонсированных продуктах от Intel (Project Alloy) и Qualcomm (VR820).

Среди open-source решений можно выделить ORB-SLAM (Oriented FAST and Rotated BRIEF), LSD-SLAM (Large-Scale Direct Monocular), PTAM-GPL.

ORB-SLAM

Одна из наиболее популярных реализаций SLAM. Данный метод основан на детекторе ключевых точек ORB. Высокая скорость детектора ORB позволяет методу работать в реальном времени в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. На рисунке 14 показаны основные компоненты алгоритма. Его работа разделена на три основных потока. **Tracking** — отслеживание кадров. Данный поток приблизительно определяет текущее положение камеры путем поиска похожего кадра в локальной карте и сопоставления ключевых точек с найденным кадром. **Local Mapping** — выполняет построение карты вблизи текущего положения камеры и оптимизирует карту. **Loop Closing** — алгоритм замыкания циклов, который ищет и объединяет похожие кадры.

Первый шаг алгоритма — инициализация карты, которая состоит из карты точек (MapPoints) и ключевых кадров (KeyFrames). Ключевые кадры сохраняют информацию о положении камеры и ключевых точках, присутствующих на кадре. Далее с использованием карты точек и ключевых кадров выполняется построение неориентированного взвешенного графа пересечений (Covisibility Graph). В данном графе каждый кадр представляет собой узел. Пара узлов связывается ребрами, если у соответствующей пары кадров наблюдается более 15-ти общих точек карты. Весом ребер является число общих точек.

Поток Tracking отслеживает перемещение камеры. Он извлекает ключевые точки с помощью алгоритма ORB, а затем пытается сопоставить их с предыдущим кадром. В случае неудачи выполняется релокализация. В случае успешного сопоставления в графе пересечений ключевых кадров ищется локальная карта, после чего производится сопоставление точек текущего кадра с точками в локальной карте путем проекции. И, наконец, выполняется оптимизация локальной карты (Local BA), с помощью которой уточняется положение камеры.

Модуль локального построения карты (LocalMapping) обрабатывает новые кадры и добавляет их в граф пересечений и остовное дерево графа. Кроме того, он выполняет локальную оптимизацию карты (Local BA) для получения более точной реконструкции облака точек вблизи положения камеры.

Модуль замыкания циклов (LoopClosing) ищет похожие кадры для каждого нового кадра. Если такие кадры найдены — для них и текущего кадра вычисляется преобразование подобия (Compute SE3). Затем положения найденного и текущего кадров выравниваются путем применения найденного преобразования, а одинаковые ключевые точки объединяются.

Кроме локальной оптимизации, ORB SLAM выполняет глобальную оптимизацию карты (Full BA), которая позволяет уменьшить накопленную ошибку с учетом найденных замыканий циклов.

Когда использовать ORB SLAM?

Если Вам нужен быстрый алгоритм, который должен работать, например, onboard, и окружение не содержит крупных плоских однотонных объектов – тогда Вам отлично подойдет ORB SLAM.

LSD-SLAM

Алгоритм включает в себя три основных модуля: tracking, depth map estimation и map optimization. Схема модулей показана на рисунке 16.

Модуль **tracking** непрерывно отслеживает новые изображения с камеры и определяет перемещение камеры. Для оценки перемещения вычисляется преобразование подобия между предыдущим и новым кадрами. В отличие от ORB SLAM, основанном на сопоставлении ключевых точек, в LSD SLAM для расчета преобразования используется минимизация фотометрической ошибки.

Модуль **depthmapestimation** сравнивает новый кадр с текущим, а затем уточняет или полностью заменяет текущий кадр. Для сравнения используется взвешенная сумма относительного расстояния от нового кадра до текущего и углов поворота между ними. Если вычисленная сумма больше заданного порога — текущий кадр заменяется новым.

Модуль **mapoptimization** выполняет оптимизацию карты. Оптимизация позволяет предотвратить накопление ошибок в отслеживании местоположения и поддерживает точность построения карты окружающей среды. Оптимизация выполняется библиотекой g2o непрерывно в отдельном потоке.

Для хранения карты окружающей среды используется граф. Каждый узел графа хранит изображение, и соответствующую ему обратную карту глубины. Узлы соединяются ребрами, которые содержат найденное преобразование подобия между двумя изображениями.

Когда использовать LSD SLAM?

Если Вам необходима плотная карта местности (например, для построения карты препятствий), или окружение не содержит достаточно фич (features), то есть включает слаботекстурированные крупные объекты, и Ваша платформа предоставляет достаточные вычислительные возможности, тогда Вам подойдет LSD SLAM.

Сравнение алгоритмов ORB-SLAM и LSD-SLAM

1. Оба алгоритма имеют открытый исходный код, и опубликованы под лицензией GPL.
2. Оба алгоритма имеют интеграцию со средой ROS (Robot Operating System, популярный робототехнический фреймворк). Недостатком LSD SLAM является отсутствие поддержки последних версий ROS: алгоритм не обновлялся с 2011 года.

3. LSD SLAM имеет реализацию только для монокулярной камеры. ORB SLAM поддерживает работу с монокулярными, стерео и RGB-D камерами.
4. ORB SLAM значительно менее требователен к ресурсам, и способен работать в реальном времени, например, на Raspberry PI (популярном микрокомпьютере с тактовой частотой 1–1.5 ГГц). LSD SLAM менее производителен, поскольку хранит и обрабатывает существенно больший объем информации (изображения целиком, а не только ключевые точки), и для приемлемой работы требует значительных вычислительных ресурсов.
5. В отличие от первого алгоритма, LSD SLAM способен строить плотную карту окружающей среды, которую можно использовать для планирования пути в среде с препятствиями.

Сравнение алгоритмов монокулярного SLAM

Сравнивая монокулярные алгоритмы, основанные на фичах, с так называемыми direct алгоритмами, использующими изображения целиком, создатель LSD SLAM Jacob Engel показал на одной из своих презентаций такую таблицу: (таблица 2)

rolling shutter – искажение формы быстро движущихся объектов

Инерциальный трекинг

Современные инерциальные измерительные системы (IMU) на основе MEMS-технологии (МЭМС – микроэлектромеханические системы) позволяют отслеживать ориентацию (roll, pitch, yaw) в пространстве с большой точностью и минимальными задержками.

Благодаря алгоритмам «sensor fusion» на основе комплементарного фильтра или фильтра Калмана данные с гироскопа и акселерометра успешно

корректируют друг друга и обеспечивают точность как для кратковременных измерений, так и для длительного периода.

Однако определение координат (перемещения) за счёт двойного интегрирования линейного ускорения (dead reckoning), вычисленного из сырых данных с акселерометра, не удовлетворяет требованиям по точности на длительных периодах времени. Акселерометр сам по себе даёт сильно зашумленные данные, и при интегрировании ошибка увеличивается со временем квадратично.

Решить данную проблему помогает комбинирование инерциального подхода к трекингу с другими методами, которые периодически корректируют, так называемый, дрейф акселерометра.

Гибридные методы

Так как ни один из методов не является безупречным, и все они имеют свои слабые места, наиболее разумно комбинировать различные методы отслеживания. Так инерциальный трекинг (IMU) может обеспечить высокую частоту обновления данных (до 1000 Гц), в то время как оптические методы могут дать стабильную точность в длительные периоды времени (корректирование дрейфа).

Гибридные методы отслеживания основаны на алгоритмах "Sensor Fusion", наиболее популярным из которых является расширенный фильтр Калмана (EKF — Extended Kalman Filter).