

Платформа на основе дополненной реальности, поддерживающая визуальный контроль для автомобильной промышленности



*applied system
innovation*

Augmented Reality-Based Framework Supporting Visual Inspection for Automotive Industry

Amal Chouchene ,Adriana Ventura Carvalho ,Fernando Charrua-Santos and Walid Barhoumi

Appl. Syst. Innov. 2022, 5(3), 48; <https://doi.org/10.3390/asi5030048>

(Эта статья относится к специальному выпуску «Расширенные технологии виртуальной реальности и их приложения»)

Сигнальный перевод 2022 г. Куприяновский В.П. v.kupriyanovsky@rut.digital

Абстракт

Визуальный осмотр в промышленной среде привлек значительное внимание исследователей с точки зрения его связи с повышением производительности и его влияния на создание Индустрии 4.0. Одним из столпов Индустрии 4.0 является технология дополненной реальности (AR), которая позволяет выполнять несколько задач, таких как техническое обслуживание, сборка и проверка. Тем не менее, такой инструмент представления данных по существу опирается на данные, собранные из других модулей. Ключевой технологией сбора, хранения и использования данных является платформа промышленного Интернета вещей (IIoT). В этом контексте в данной статье предлагается инновационная структура в реальной индустрии тематических исследований. Предлагаемое решение поддерживает визуальный контроль, полагаясь на AR для представления данных и IIoT для их сбора с производственной линии. Приемочные испытания и отзывы пользователей отражают точность и эффективность предлагаемой системы, особенно при использовании портативных устройств (HND).

Ключевые слова: визуальный осмотр; Индустрия 4.0; дополненная реальность; промышленный интернет вещей; рамки

1. Введение

Принятие четвертой промышленной революции (Индустрия 4.0) требует использования глобальной и децентрализованной технологии производства [1]. Этот метод должен в основном полагаться на полностью интегрированные системы совместного производства [2], представляющие концепцию Интернета вещей (IoT) и передачи данных в реальном времени. Наличие такой технологии в промышленной сети представило известную концепцию промышленного Интернета вещей (IIoT), которая является одним из основных столпов Индустрии 4.0. IIoT относится к сотрудничеству нескольких компонентов, таких как датчики, инструменты, устройства, компьютеры и даже люди [3], что позволяет улучшить глобальную визуализацию с целью увеличения производства [4], обеспечивая в то же время безопасность данных [5]. Для изучаемой отрасли, которую мы сохраняем анонимной из соображений конфиденциальности, следует рассмотреть новую архитектуру IIoT для более

стандартизированной связи для внедрения Индустрии 4.0. Кроме того, основной целью отрасли является разработка и спецификация когнитивного помощника на основе дополненной реальности (AR), который должен быть определен для обеспечения представления информации с меньшей когнитивной нагрузкой на оператора. Чтобы свести к минимуму время обработки в процессе производства, в исследуемой автомобильной промышленности было принято решение внедрить систему контроля только на конечной станции сборочной линии. Причиной выбора именно этой станции является то, что это единственная станция, где дефекты транспортных средств обрабатываются и исправляются. Традиционно операция проверки и исправления выполняется человеком-оператором, который, читая идентификационный документ, который следует за транспортным средством в процессе производства, идентифицирует транспортное средство, присутствующее на станции, и показывает его на экране. Экран расположен на краю производственной линии рядом с этой станцией, чтобы отображать все дефекты, которые необходимо исправить в автомобиле. Оператор запоминает эту информацию и затем подходит к транспортному средству для устранения несоответствий, а затем возвращается к компьютеру, чтобы подтвердить в системе исправление или неисправление дефектов. Таким образом, эта задача остается трудной и сопряжена с высокой вероятностью ошибок. Аналогичный процесс (проводка) в [6] также подтверждает, что эти типы задач требуют много времени, независимо от уровня квалификации техников. В качестве решения авторы в [7] доказывают способность систем дополненной реальности решать проблемы эффективности, такие как недостаточная подготовка работников или сложные задачи.

Поэтому для лучшей организации и эффективности предлагается система когнитивного помощника, которая быстро показывает задачи, которые необходимо выполнить после того, как транспортное средство будет распознано системой. В этой работе мы приняли Unity 3D для визуализации данных когнитивной системы, учитывая ее гибкость и возможность встраивания на несколько платформ [8]. Для использования данных мы приобрели протокол Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) [9] через платформу IIoT, учитывая простоту, скорость и безопасность системы обмена сообщениями [10]. Процесс внедрения состоит из следующих шагов: Во-первых, сканируется и распознается маркер для идентификации автомобиля. Во-вторых, система предоставляет информацию о несоответствии транспортного средства через платформу IIoT оператору в пользовательском интерфейсе (UI). Затем оператор сможет взаимодействовать с пользовательским интерфейсом, чтобы подтвердить/отменить исправление несоответствия.

Оставшаяся часть теста организована следующим образом. Существующая литература по вариантам использования дополненной реальности в автомобильной промышленности кратко обсуждается в разделе 2. В разделе 3 описывается предлагаемый метод проверки для повышения производительности в производственной линии изучаемой отрасли. Результаты предлагаемой системы представлены в Разделе 4, а Раздел 5 завершает документ, демонстрируя перспективы на будущее.

2. AR в индустрии

В этой работе AR является принятой технологией визуализации данных. AR Попытки интегрировать информацию/виртуальные модели, такие как компьютерная графика, тексты, звуки и другие модальности, в физическую среду, чтобы пользователи понимали эту информацию как существующую в режиме реального времени. Связь в режиме реального времени играет ключевую роль и остается проблемой для реализации приложений дополненной реальности [11]. Согласно [7], стандартная система дополненной реальности состоит из четырех основных компонентов. Во-первых, устройством визуализации могут быть головные дисплеи (HMD), портативные устройства (HND), статистические устройства и проекторы. Во-вторых, камера является основным компонентом системы дополненной реальности для отображения

окружающей среды. В-третьих, система слежения служит для точного переноса виртуальных объектов в реальную среду. Системы слежения можно разделить на два основных класса в зависимости от целей и приложений дополненной реальности: отслеживание на основе маркеров и отслеживание без маркеров [12]. Тем не менее, AR на основе маркеров является наиболее распространенной технологией AR [7], поскольку она обеспечивает лучшую точность при простоте реализации [12]. Системы на основе маркеров в основном полагаются на использование визуального маркера [13]. Распознавание маркеров приложениями AR переносит виртуальную информацию в реальный мир. Напротив, безмаркерные системы [14] предоставляют визуальные данные, вычисляя, например, местоположение пользователя.

В производственной среде, учитывая влияние слишком высокой когнитивной нагрузки на работоспособность человека, внедрение такой технологии потенциально может оказать существенное влияние на результат того же качества и производительности [15]. Более того, в недавней статье А. Сегура и др. [16], авторы подчеркивают насущную потребность в технологиях визуальных вычислений с учетом дополненной реальности для поддержки оператора в отраслях 4.0. За последние годы факт роста производительности и качества при использовании AR побуждает исследователей работать над интеграцией такой технологии в производственную среду [11]. Недавние исследования в области промышленности в основном показывают следующие варианты использования AR: сборка, техническое обслуживание и обучение. Однако, насколько нам известно, в литературе имеется очень мало публикаций, в которых рассматривается вопрос инспекции на основе AR, что указывает на огромный пробел в литературе, связанный с реальными вариантами использования реализации AR для инспекционной деятельности. У. Урбас и др. [17] также обнаружили, что большая часть работ сосредоточена на техническом обслуживании и сборке, что представляет пробел в исследованиях инспекции с помощью AR. Более того, авторы в [17] подтвердили, что большинство существующих работ не только ограничиваются задачами обслуживания и сборки, но и представляют собой принципиально концептуальные рамки для использования AR. Причиной этого является наличие конкретных стандартов и руководств в целом при реализации AR и, в частности, при проверке [17]. Кроме того, внедрение дополненной реальности из лабораторий в реальные варианты использования в промышленности обнажает несколько проблем, которые могут объяснить основную причину огромного пробела в работах, связанных с дополненной реальностью для инспекции. Большинство существующих проблем связаны с проблемами безопасности, аппаратной совместимостью и весом, а также с правильным функционированием программного обеспечения в реальной отраслевой среде, которая подвержена множеству факторов, таких как пыль, эргономические причины и особенно принятие технологии человеком. [7,18,19].

Сосредоточившись на автомобильной сфере, операторы в настоящее время должны иметь дело с огромным объемом данных во время производства автомобиля или даже на этапе диагностики. В большинстве автомобильных отраслей информация о транспортном средстве доступна через станцию рядом с каждым этапом производства или даже в документе на самом транспортном средстве. В этих случаях для задач проверки оператор сталкивается с проблемой времени, чтобы помочь и устранить дефекты транспортного средства. Время, необходимое для выполнения Инспекционная деятельность все больше требует сокращения в автомобильной промышленности, особенно в тех, которые производят высокотехнологичные автомобили, где проверка готового автомобиля требует длительного времени [20]. Однако приложения AR, как правило, настраиваются под конкретные отраслевые нужды, поэтому коммерциализировать их невозможно, особенно учитывая высокую стоимость коммерческого внедрения. Для этого можно найти очень мало работ по проверке с помощью AR. Один из примеров AR на основе осмотра представлен Bosh в [21], где компания внедряет собственное программное обеспечение для безмаркерного подключенного ремонта для диагностики оборудования автомобиля (см.

рис. 1а). Внедренная система не только идентифицирует источники неисправности в автомобиле, но и направляет оператора для эффективной диагностики и ремонта, показывая задачи, которые необходимо выполнить. Volkswagen также создал систему дополненной реальности без маркеров под названием MARTA (Mobile Augmented Reality Technical Assistance) для модели XL1 (см. рис. 1b). MARTA показывает оператору список задач, которые необходимо выполнить в процессе проверки, а также дает возможность помочь на этапе исправления, добавляя к реальной сцене инструкции перед оператором [22]. Еще одно AR-решение в автомобильной промышленности описано в [23], где авторы внедрили AR-систему для осмотра и обслуживания подкапотного пространства (см. рис. 1c). Аналогичным образом, в [24] авторы разработали и внедрили пространственную AR-систему на основе маркеров для контроля точечной сварки. Предлагаемая система дополненной реальности в основном опирается на метод проецирования данных, который служит в этом случае использованием для отображения информации, связанной с дефектами сварки (см. рис. 1d).

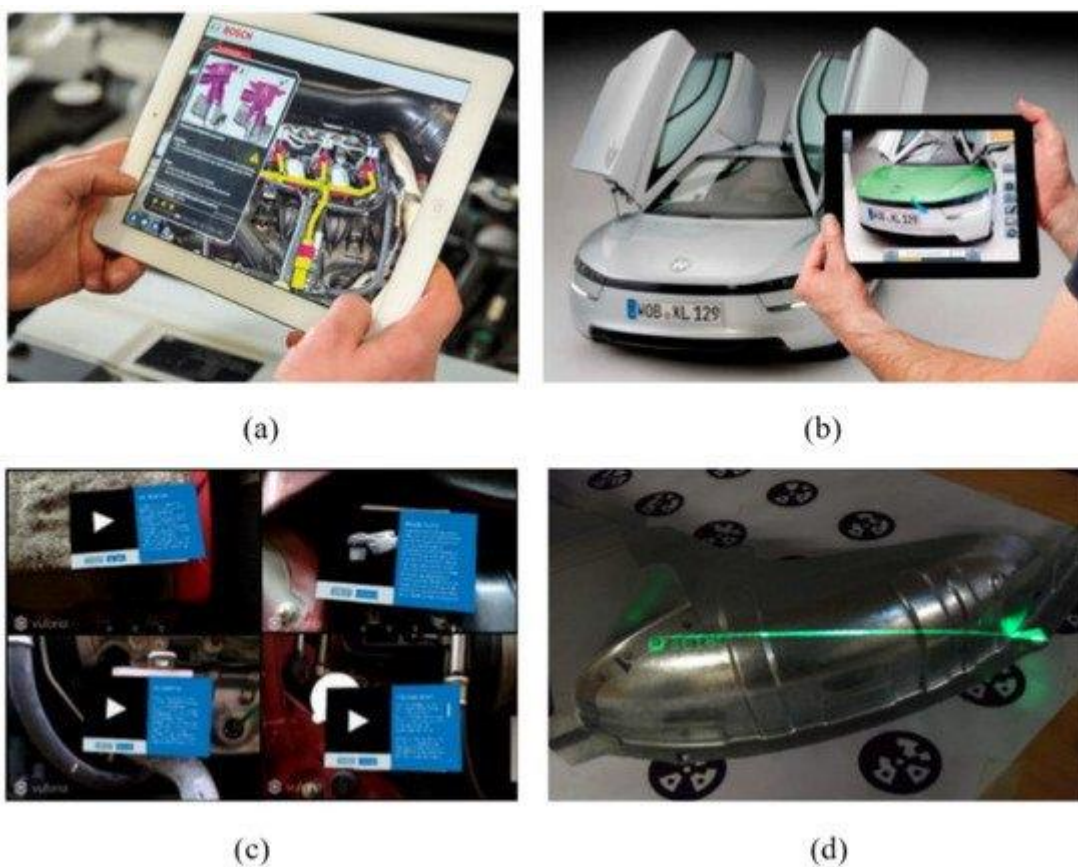


Рисунок 1. Примеры инспекции с помощью приложения AR для: (а) промышленности Bosh [25], (b) промышленности Volkswagen [22], (c) инспекции под капотом [23], (d) инспекции точечной сварки [24].

Во всех вышеперечисленных работах авторы доказали эффективность и оперативность применения AR для проведения проверок. Результаты этих работ показывают, что отказ от ручных или даже компьютерных методов контроля приводит к значительному выигрышу времени при более высокой точности выполнения задач. Несмотря на то, что существует несколько работ по проверке с помощью AR, существующие результаты при внедрении AR и прогресс, с которым мы сталкиваемся в технологии, должны побудить исследователей больше работать над этой технологией, особенно в отраслевой сфере, когда ее внедрение может способствовать повышению производительности.

3. Предлагаемая когнитивная система для проверки

3.1. Предыстория

В этом разделе мы подробно описываем прежний способ проверки на целевой станции, которая находится в конце производственной линии в автомобильной промышленности. Информация выводится через экран, где указан перечень дефектов, которые есть у автомобиля на станции в данный момент и которые необходимо осмотреть. На этом экране отображаются два списка, верхний из которых показывает список дефектов автомобиля, так что дефекты, которые еще не были устранены, отмечены красным цветом, а те, которые уже устранены, отображаются зеленым цветом. В нижней части экрана показаны элементы управления, выполненные с транспортным средством на линии, зеленым цветом те, которые уже были выполнены, и желтым цветом, которые еще предстоит выполнить. Принимая во внимание рабочую станцию, на которой должна быть реализована система дополненной реальности, идентифицированную как наиболее критическую должность, предполагается разработать приложение дополненной реальности с осязаемым пользовательским интерфейсом, которое через дисплей демонстрирует то, что в данный момент отображается на экране (см. рис. 2) в интерактивном и динамическом режиме, снижая при этом когнитивную нагрузку, необходимую для выполнения операции, чтобы оператор мог иметь доступ на той же станции к несоответствиям, приступить к исправлению аномалий, которые будут автоматически валидированы как ретушь выполняется, предотвращая завершение операции до тех пор, пока не будут исправлены все аномалии. Таким образом, потери времени, выявленные в текущей системе, будут значительно сокращены, а автомобиль не будет признан годным к продаже. Согласно данным, предоставленным автомобильной промышленностью, на заводе все рабочие места имеют определенные диапазоны и в основном характеризуются циклическими и повторяющимися операциями. За время цикла, около 228 с, оператор должен будет выполнить все задачи, необходимые для занимаемой им должности при сборке автомобиля. С точки зрения познавательной нагрузки, кроме обучения на тренингах, посты, составляющие конвейер, имеют пониженный уровень востребованности, так как большинство частей уже ранее были разделены, а на poste только контроль. Поэтому операторы несут ответственность только за проверку и сборку деталей. Эта станция была определена как станция для внедрения технологии AR.

	Estad	Localização/Natureza	C	Loc	Resp	Data deteção	T	Detetor
Deleted		LANTERNA AR ESQ / PAINEL LAT AR ESQ/jogo excessivo (6S)	CVMP	MON		14/05/19 14:47:11	M	MGL005
Deleted		GUARNICAO MONT BAE PARA-BRISAS ESQ/mal ajustado (9P)	CVMC	HPC		14/05/19 14:44:26	M	MGL009
Deleted		PORTA AV ESQ / PAINEL LAT ESQ/desafioramento (8KDK304)	CVMC	FER		14/05/19 14:43:16	M	MGL009
Deleted		CALANDRA / CAPOT/retraido (8HDU3075)	CVMC	ENG		14/05/19 14:42:26	M	MGL009
FECHD		VS8-DEPOSITO DE COMBUSTIVEL/multi-aperto mal realizado (M3	M3		14/05/19 12:56:21	A	API_0487
FECHD		VCB-6217-FECHADURA PLC DIR/multi-aperto falta realizar (9K	M1	M1		14/05/19 12:40:02	A	API_0211

	Estad	Loc	ID controlo	DescrL controlo	C	Controladr
FECHD		QCP	CB76A	VERIF. A DUREZA DE FECHO DA PORTA AV ESQ		U405514
FEIT OK		CVMP	CB03A	CONTROLO CVM2 PASSAG.		U076657
FEIT OK		CVMC	CB04A	CONTROLO CVM2 CONDUTOR		PORT5002
FEIT OK		MON	0009A	FAZER ODISSE		U341193
FEIT OK		CVM1	CB01A	CONTROLO CVM1		U405391
FEIT OK		PEI	CP37A	CONTR MASTIQUE FURADO TEJAD AV DIR E ESQ		

Рисунок 2. Экран станции окончательной проверки изучаемой отрасли.

3.2. Концепция и дизайн системы когнитивного помощника

Мы представляем предлагаемую когнитивную систему для изучаемой отрасли. Наша работа обеспечивает как обработку данных с платформы IIoT, так и пользовательский интерфейс для проверки, исправления соответствия и отправки данных обратно на главный сервер. На рис. 3

показана предлагаемая архитектура автомобильной производственной линии для поддержки концепции «Индустрия 4.0». Действительно, предлагаемый когнитивный помощник в основном состоит из двух частей, подробно описанных ниже. Первая часть касается способа передачи данных через платформу IIoT, тогда как вторая часть представляет, как данные визуализируются для операторов.

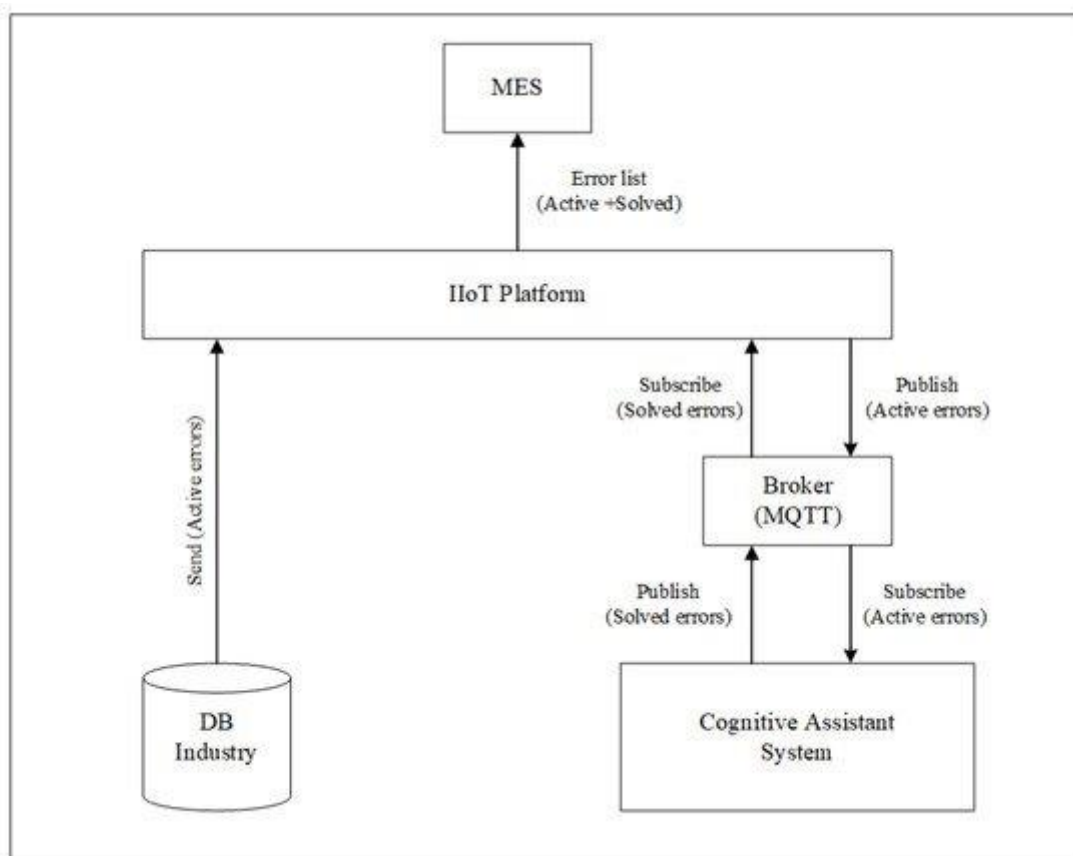


Рис. 3. Предлагаемая архитектура передачи данных для автомобильной промышленности.

3.2.1. Передача данных на основе MQTT

На протяжении всей производственной линии транспортное средство обслуживается и исследуется набором датчиков, показывающих его состояние соответствия. Чтобы избежать прямого доступа к основной отраслевой базе данных (БД), обеспечив безопасность данных, для потока данных была реализована платформа IIoT. В окончательном серийном производстве транспортное средство должно быть проверено оператором на основе списка активных ошибок, которые предоставляются БД автомобильной промышленности и которые необходимо исправить. Следующий шаг состоит в отображении этого списка ошибок в пользовательском интерфейсе. Для этого используется протокол MQTT для передачи данных между платформой IIoT и всеми остальными компонентами. Протокол MQTT считается одним из основных протоколов обмена сообщениями IIoT благодаря его высокой скорости передачи данных от машины к машине, что является крайне необходимым требованием в производственной среде. В отличие от веб-решения, которое представляет собой связь между клиентом и сервером, MQTT опирается на концепцию публикации-подписки, позволяющую нескольким клиентам подключаться к уникальному серверу, который называется брокером [26]. Эти клиенты смогут публиковать и/или подписываться на определенную тему через подключение к брокеру MQTT. Кроме того, брокер считается администратором техники публикации/подписки. Его ключевая роль состоит в получении, фильтрации и отправке сообщений соответствующим подписавшимся клиентам [27]. Клиентами в нашем сценарии являются как система когнитивного помощника, так

и платформа IIoT, которая может подключаться, подписываться и публиковаться в брокере. Получив список ошибок, собранный с датчиков и сохраненный в основной отраслевой БД, платформа IIoT сможет подключиться к MQTT-брокеру, а также опубликовать в нем этот список. С другой стороны, система когнитивного помощника подключается к тому же брокеру и подписывается на тему активных ошибок. Эти последние обрабатываются оператором, и в конечном процессе предлагаемая система сможет отправить список устраненных ошибок тому же брокеру. После этого платформа IIoT подписывается на тему, связанную со списком элементов управления, решаемых оператором, и отправляет окончательный список для хранения в системах управления производством (MES). Действительно, MES представляет собой систему, работающую в режиме реального времени, поддерживающую концепцию Индустрии 4.0, определение местоположения, мобильность и расширенную аналитику для скорейшего выявления наиболее вероятных проблем [28]. Основная цель внедрения такой системы в Индустрии 4.0 — обеспечить высокую производительность и гарантировать быстроту при быстром изменении требований клиентов [29]. В нашем контексте используемая MES разработана критическим производством [28], базирующимся в Португалии, с основными чертами децентрализации и вертикальной и горизонтальной интеграции.

В следующем подразделе подробно описывается способ визуализации данных и управления ими со стороны оператора.

3.2.2. Визуализация данных через систему Cognitive Assistant

Когнитивные помощники поддерживают людей и расширяют их возможности в решении самых разных сложных задач. В этом разделе мы представляем когнитивного помощника, разработанного с использованием технологии дополненной реальности с целью повышения производительности оператора и способности быстро принимать решения. Другими словами, помощь оператору путем отображения дефекта и его определения, чтобы помочь принять решение об устранении дефектов отсканированного транспортного средства на конечной станции.

Следовательно, разработанное приложение AR отображает пользовательский интерфейс, включающий список задач, которые необходимо проверить. Оператор, выполняя проверку, считывает элементы управления, отображаемые на дисплее, не отрывая взгляда от объекта проверки, при этом сокращается время проверки и избегаются ошибки, которые могут возникнуть при упущении некоторых элементов. На основе данного сценария, подробно описанного в разделе 3.1, и текущего интерфейса проверки (см. рис. 2) мы предложили пользовательский интерфейс, в котором оператор мог бы визуализировать все дефекты в одной таблице. Из соображений эргономики мы решили отображать список элементов управления и ошибок, которые должны быть исправлены оператором, в одной таблице, различая их разными цветами следующим образом: красный для ошибок и синий для элементов управления. Как упоминалось ранее, для концепции и реализации пользовательского интерфейса мы выбрали Unity 3D в качестве разработчика. ент платформа. Однако за счет интеграции этой основной платформы с комплектом разработки программного обеспечения дополненной реальности предлагаемая система получает возможность обнаруживать AR-маркер (идентификатор транспортного средства), появляющийся в поле зрения камеры, и проецировать виртуальную таблицу с соответствующими заданиями. в реальный мир. В нашем случае принятие дополненной реальности на основе маркеров имеет решающее значение и является более точным, поскольку у транспортного средства уже есть идентификатор в формате QR или штрих-кода. Еще одним преимуществом использования AR на основе маркеров является снижение стоимости вычислений по сравнению с другим типом AR, когда маркер определен правильно [14]. Идея использования Vuforia заключается в том, что такая технология может точно определять эти форматы маркера, поддерживая одновременно любое устройство с камерой

[30]. В литературе исследования показали, что Vuforia лучше всего подходит для приложений AR с 2018 года [31]. Во-первых, время, необходимое для запуска приложения AR с помощью Vuforia, обычно меньше, чем при использовании других SDK, таких как AR toolkit. Во-вторых, в исследованиях отслеживания изображения время отслеживания остается постоянным с увеличением расстояния, поэтому расстояние между изображением распознавания и камерой не влияет на отслеживание. Наконец, время перекачивания, полученное с тремя разными устройствами на разных расстояниях, часто оказывается самым низким [14].

Следовательно, с помощью предлагаемой системы оператор может проверять состояние проверенных и исправленных ошибок, используя метод сенсорного ввода. Перед каждой ошибкой в списке предусмотрены кнопки, нажимаемые при выполнении задачи оператором. Нажатие кнопки генерирует удаление задачи из пользовательского интерфейса, но она остается сохраненной в системе для окончательной передачи и сохранения в MES. На рис. 4 показан способ реализации описанного выше сценария с использованием эталонной модели 4C (вычисления, связь, координация и конфигурация) [32].

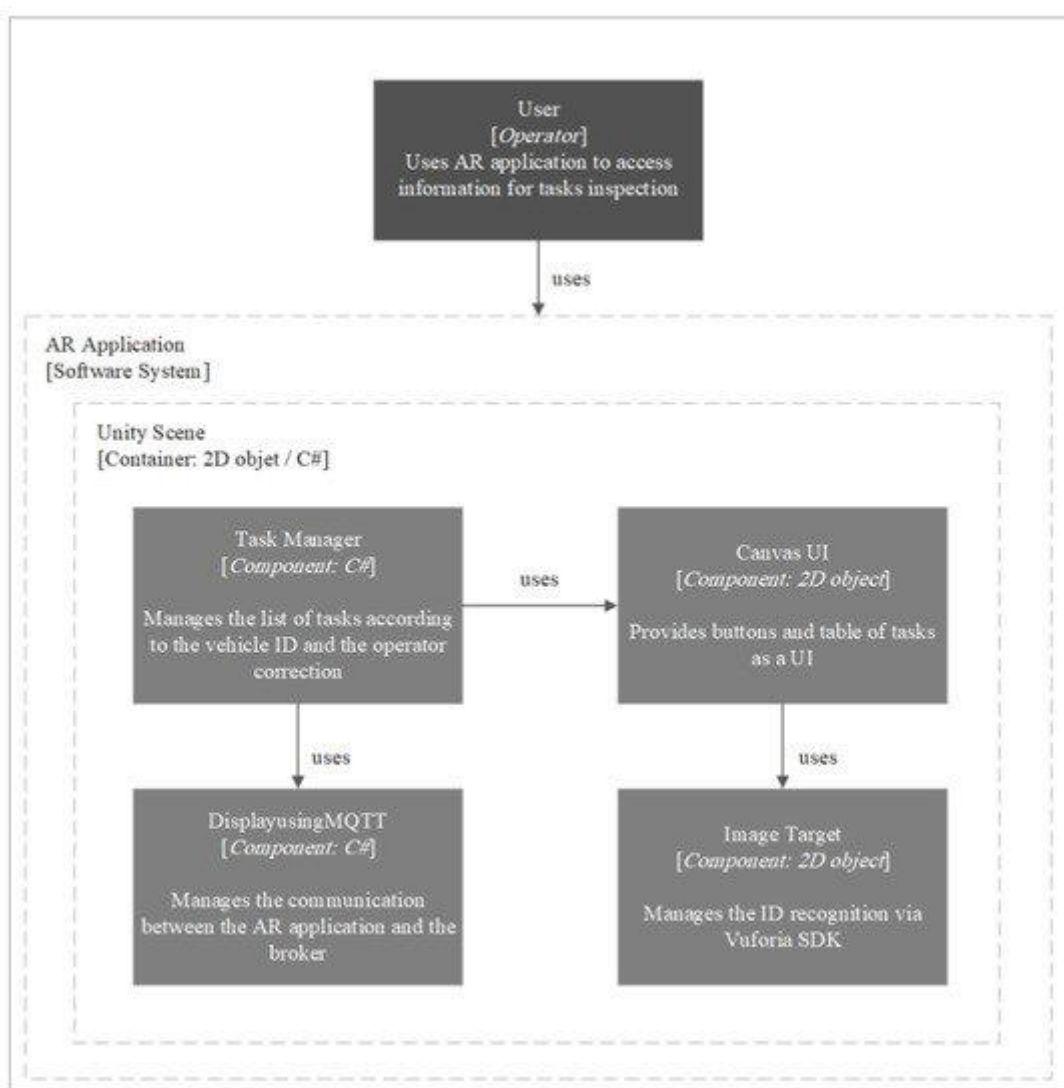


Рисунок 4. Программная основа когнитивной системы.

4. Результат и проверка

Как упоминалось ранее, во время осмотра автомобиля оператор должен проверить и исправить дефекты, возникающие на производственной линии. Для этого был разработан

пользовательский интерфейс с использованием Unity 3D для динамического отображения списка ошибок и элементов управления, как показано на рисунке 5.

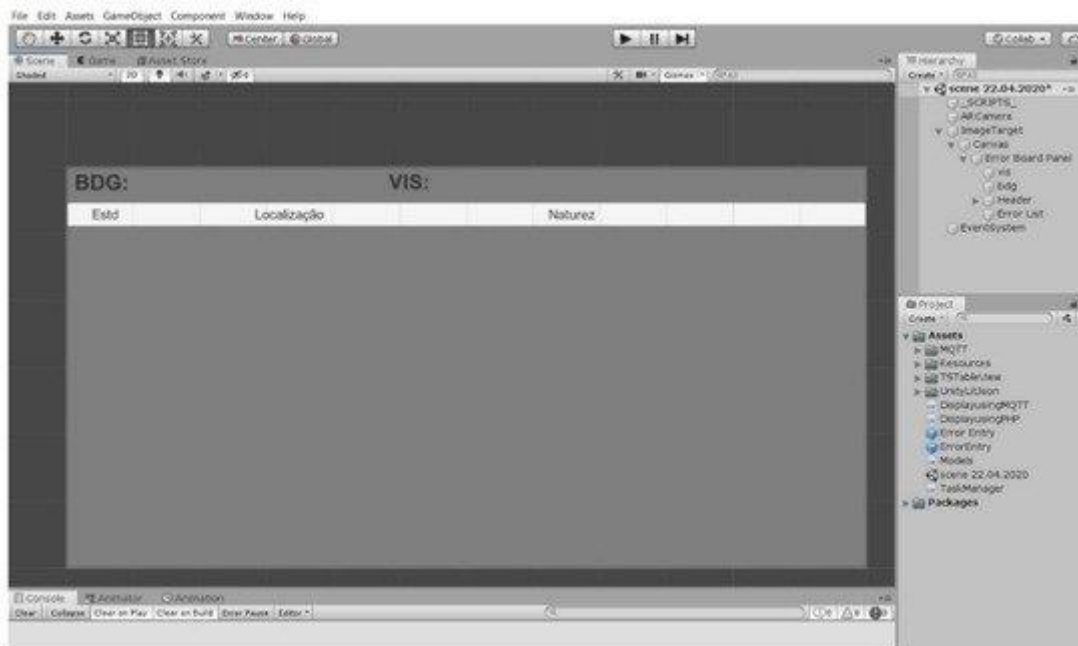


Рисунок 5. Снимок экрана нашей среды разработки (Unity), демонстрирующий дизайн пользовательского интерфейса, где BDG/VIS, Estd, Localizaçao и Naturez представляют соответственно: идентификатор транспортного средства, тип дефекта (Контроль/ошибка), местоположение дефекта в транспортное средство и описание дефекта.

Кроме того, в приложение дополненной реальности включены маркеры, хранящиеся в облачной базе данных с помощью Vuforia SDK, идентифицирующие транспортное средство, которое необходимо отслеживать. В нашем сценарии маркер представлен в формате QR-кода, учитывая его резкость и точность. Основным результатом этого исследования является то, что предлагаемая система была успешно встроена в платформы Windows (см. рис. 6) и Android (см. рис. 7 и рис. 8). Для Android, который является нашей основной целевой платформой для требований автомобильной промышленности, предлагаемая система сохраняется в формате приложения типа *.APK. Мы также встроили приложение дополненной реальности в головной дисплей дополненной реальности (HMD), платформу на базе Android, которая представляет собой интеллектуальное стекло Vuzix M300 [33]. Учитывая его малый вес (140 г), исследуемая отрасль решила реализовать предложенную систему на смарт-очках Vuzix M300.

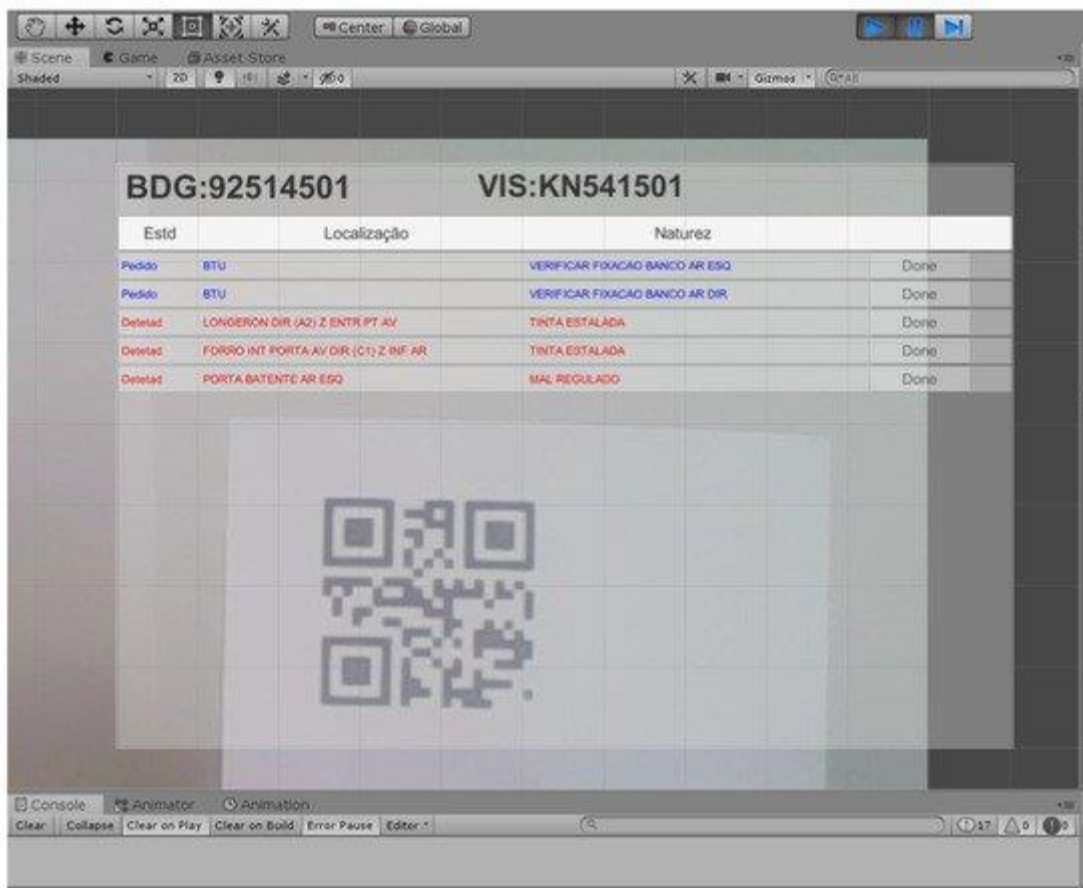


Рисунок 6. Скриншот выполнения системы на платформе Windows.



Рисунок 7. Скриншоты выполнения системы на платформе Android при идентификации Маркера с помощью Vuforia (a) после и (b) до корректировки операторских задач.

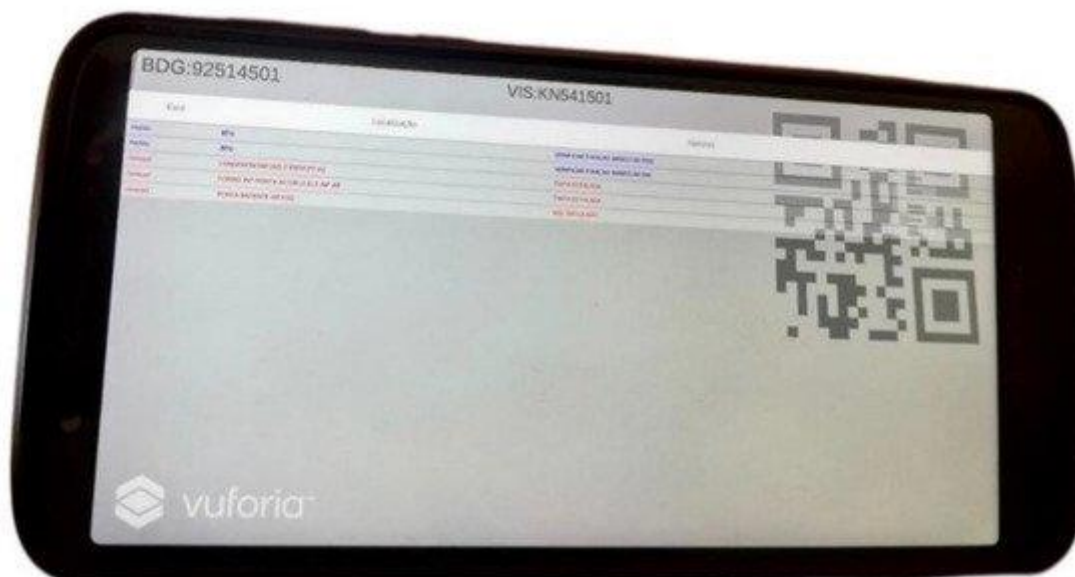


Рис. 8. Выполнение системы на Android-устройстве.

Чтобы проверить правильность предлагаемой системы AR, мы провели несколько экспериментов. Для этого мы обратились к базе критериев, определенных в [11] для оценки системы AR, а именно: надежность, отзывчивость и гибкость. Мы начали с исследования надежности, проверив соответствие данных, полученных с платформы IIoT. Глобальная валидация была выполнена в других организациях, которые отвечали за концепцию платформы IIoT. Экспериментальные испытания с использованием предложенной системы дополненной реальности и платформы IIoT завершились успешно. Действительно, валидация проводилась на разных этапах. Во-первых, спецификация и дизайн системы были согласованы с основным заказчиком, которым является изучаемая автомобильная промышленность. Во-вторых, успешно завершена интеграция системы с остальными внедренными модулями для автомобильной промышленности в части корректной передачи данных и визуализации. Для критериев отзывчивости, которые означают возможность предоставления дополненного контента как можно быстрее, мы измерили время, необходимое для запуска нашей системы дополненной реальности. Для отображения задач, связанных с транспортным средством, системе дополненной реальности требовалось в среднем около 1 с, когда маркер находится в поле зрения камеры. Это значение можно считать низким, обеспечивающим респонсивность наивности. Затем, что касается гибкости, топология программного обеспечения разрабатывается таким образом, чтобы поддерживать любое устройство. Кроме того, предлагаемая система дополненной реальности реагирует и точно предоставляет 2D-информацию даже при изменении угла обзора или положения устройства (вертикальное/горизонтальное/наклонное).

В заключение важно оценить приемлемость для пользователя с точки зрения эргономики и условий работы. Были опрошены десять человек двух разных профилей (пять исследователей и пять операторов) для оценки эффективности системы дополненной реальности в таком производственном процессе. Причина небольшого количества пользователей тесно связана с конфиденциальностью, как того требует изучаемая отрасль. Тесты проводятся с участием пяти исследователей в одной лаборатории, вовлеченных в один и тот же проект, но с разным исследовательским опытом, чтобы избежать максимального риска систематической ошибки в результатах. Выбранными исследователями являются два профессора и три кандидата наук. студентов, связанных с различными задачами в изучаемой отрасли. Что касается количества операторов, мы выбрали пять случайных операторов, работающих в разные смены на последнем пункте контроля, где мы внедрили систему. На основе анкеты, представленной в [34] для оценки

приложений промышленной виртуальной реальности (VR), мы предложили следующую анкету для анализа пользовательского опыта:

Испытывали ли вы головокружение во время или после использования дополненной реальности?

Вы нашли список задач разборчивым?

Являются ли выбранные цвета четкими и читаемыми?

Соответствует ли разработанный интерфейс условиям освещения?

Является ли способ взаимодействия внутри системы удобным и простым?

Считаете ли вы, что система экономит время?

Легче ли обрабатывать дефекты транспортных средств с помощью предлагаемой системы AR?

Считаете ли вы устройство адекватным для такой задачи?

Можно указать пять возможных ответов: очень недоволен (2 балла), недоволен (4 балла), ни согласен, ни не согласен (6 баллов), удовлетворен (8 баллов) и очень доволен (10 баллов). В таблице 1 представлены результаты отзывов тестировщиков при тестировании системы дополненной реальности как на HHD, так и на HMD.

Таблица 1. Оценка (%) отзывов тестировщиков по анкете.

Questions	Using an HHD		Using an HMD (Vuzix M300)	
	Researchers	Operators	Researchers	Operators
(1)	92	80	56	32
(2)	100	84	68	60
(3)	84	80	60	48
(4)	88	80	84	80
(5)	100	84	44	28
(6)	80	80	48	28
(7)	80	80	40	40
(8)	96	92	40	32
Mean	90	82.5	55	43.5

По среднему значению ответов мы замечаем, что все тестировщики из обоих профилей в основном согласились с тем, что лучшим вариантом было устройство с ручкой. Кроме того, для сокращения времени, необходимого для осмотра и возможных исправлений, предлагается использовать механизм для освобождения рук оператора. Однако все испытатели подтвердили, что очки Vuzix M300 не могут быть хорошим вариантом для текущих условий работы в автомобильной промышленности. Из экспериментов с Vuzix M300 и с учетом отзывов тестировщиков мы пришли к выводу, что его маленький экран может способствовать утомлению зрения, нечеткости цветов и задач, что было подтверждено тестировщиками примерно через 8 минут использования. Более того, для пользователей, страдающих проблемами со зрением, Vuzix M300 еще больше усложняет процесс. Этот главный недостаток маленького дисплея может привести к эффекту, противоположному желаемой цели, заключающейся в увеличении производства. Поэтому настоятельно рекомендуется использовать HHD или HMD с большим дисплеем. В конце концов, что касается проверки системы и отзывов пользователей, мы можем утверждать, что этот когнитивный помощник, основанный на инструменте дополненной реальности, может служить концепции Индустрии 4.0, обеспечивая более короткое и надежное время отклика при снижении эксплуатационных расходов.

5. Выводы и перспективы на будущее

В этой статье мы представили инновационный взгляд на визуальный контроль для автомобильной промышленности, основанный на технологии дополненной реальности. AR — это технология, которая может поддерживать зрение человека. Особое внимание уделяется не только способу визуализации данных с использованием технологии дополненной реальности, но и передаче данных через платформу IIoT, использующую протокол MQTT. Кроме того, предлагаемая система имеет непосредственное практическое значение и служит для углубления концепции Индустрии 4.0 в автомобильной промышленности.

На основании результатов, представленных в разделе 4, можно сделать вывод, что предложенная когнитивная система оказалась очень успешной при использовании ручного устройства. Кроме того, исходя из отзывов пользователей, можно сделать вывод, что эта новая система в автомобильной промышленности может обеспечить более низкие эксплуатационные расходы, которые напрямую влияют на производительность.

Вне нашего конкретного сценария использования совместимость предлагаемого решения с более чем 25 платформами [35] представляет огромное преимущество для предлагаемой системы, учитывая неограниченную возможность тестирования на разных платформах в реальных случаях использования. Другими словами, предлагаемую нами систему можно использовать в различных промышленных контекстах, изменяя только модель данных и компоненты таблицы, касающиеся отраслевых потребностей/данных. Кроме того, абстракция реализованного протокола MQTT предоставляет возможность повторного использования, которая позволяет повторно использовать его для получения любых данных от брокеров в любом другом промышленном контексте.

Однако нельзя отрицать наличие некоторых ограничений при использовании дополненной реальности в промышленных условиях. Эти ограничения могут быть связаны с принятием человеком технологий или отсутствием методов взаимодействия с дополненной реальностью. В нашем случае иногда транспортное средство может иметь некоторые дефекты, которые не обнаруживаются на производственной линии. В результате эти дефекты не отображаются оператору. Однако, помимо исправления дефектов, оператор проверяет полностью готовый автомобиль. Если замечена дополнительная аномалия, система должна позволить оператору добавить свои замечания. Первоначальная идея обработать это такова: добавление новой записи в таблицу AR может быть следующим:

форма голосовой заметки, если используется HMD;

или сенсорную кнопку «плюс», если используется HND.

Ясно, что дальнейшая работа над этими вопросами будет представлять интерес.

В качестве альтернативы, еще одним будущим направлением предлагаемой системы является использование стандарта «IATF 16949», учитывая его способность к раннему предотвращению дефектов. Кроме того, стандарт IATF 16949 служит для сокращения вариаций и потерь в цепочке сборки, что может решить упомянутые выше случайные проблемы.

Вклад автора

Концептуализация, AC и FC-S; методология, AC и AVC; расследование, AC и AVC; написание - подготовка первоначального проекта, AC; написание - обзор и редактирование, F.C.-S. и В.Б.; надзор, F.C.-S. и В.Б.; администрирование проекта, F.C.-S. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке проекта 026653 | POCI-01-0247-FEDER-026653—INDTECH 4.0— Новые технологии для интеллектуального производства, совместно финансируемые программой Portugal 2020 (PT 2020), программой Compete for 2020 и Европейским Союзом через Европейский фонд регионального развития (ERDF) . Авторы благодарят возможность и финансовую поддержку, которые позволили им продолжить этот проект, Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) и C-MAST-Центр механических и аэрокосмических наук и технологий в рамках проекта UIDB/00151/2020. .

Заявление Институционального контрольного совета

Непригодный.

Заявление об информированном согласии

Непригодный.

Заявление о доступности данных

Исследование не сообщило никаких данных.

Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить «Алаа Дифаллаха», компьютерного инженера, за его вклад в процесс разработки, поделившись своим высоким опытом в Unity3D, и тестировщиков за их отзывы.

Конфликт интересов

Авторы объявили, что нет никаких конфликтов интересов.

References

1. Albers, A.; Gladysz, B.; Pinner, T.; Butenko, V.; Stürmlinger, T. Procedure for Defining the System of Objectives in the Initial Phase of an Industry 4.0 Project Focusing on Intelligent Quality Control Systems. *Procedia CIRP* **2016**, *52*, 262–267. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
2. Erboz, G. How to Define Industry 4.0: The Main Pillars of Industry 4.0. In *Managerial Trends in the Development of Enterprises in Globalization Era*; Košičiarová, I., Kádeková, Z., Eds.; Slovak University of Agriculture in Nitra: Nitra, Slovakia, 2017. [Google Scholar]
3. Boyes, H.; Hallaq, B.; Cunningham, J.; Watson, T. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Comput. Ind.* **2018**, *101*, 1–12. [Google Scholar] [CrossRef]
4. Olsen, T.L.; Tomlin, B. Industry 4.0: Opportunities and Challenges for Operations Management. *Manuf. Serv. Op. Manag.* **2020**, *22*, 113–122. [Google Scholar] [CrossRef]
5. Fuentes, D.; Correia, L.; Costa, N.; Reis, A.; Barroso, J.; Pereira, A. SAR.IoT: Secured Augmented Reality for IoT Devices Management. *Sensors* **2021**, *21*, 6001. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
6. Szajna, A.; Stryjski, R.; Woźniak, W.; Chamier-Gliszczyński, N.; Kostrzewski, M. Assessment of Augmented Reality in Manual Wiring Production Process with Use of Mobile AR Glasses. *Sensors* **2020**, *20*, 4755. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
7. Masood, T.; Egger, J. Augmented reality in support of Industry 4.0—Implementation challenges and success factors. *Robot. Comput. Manuf.* **2019**, *58*, 181–195. [Google Scholar] [CrossRef]
8. Unity. Multiplatform. Available online: <https://unity.com/features/multiplatform> (accessed on 12 May 2020).
9. OASIS. MQTT Specification. Available online: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/mqtt-v3.1.1.html> (accessed on 6 June 2020).
10. Serozhenko, M. MQTT vs. HTTP: Which One Is the Best for IoT?—MQTT Buddy—Medium. Available online: <https://medium.com/mqtt-buddy/mqtt-vs-http-which-one-is-the-best-for-iot-c868169b3105> (accessed on 12 May 2020).
11. Elia, V.; Gnoni, M.G.; Lanzilotto, A. Evaluating the application of augmented reality devices in manufacturing from a process point of view: An AHP based model. *Expert Syst. Appl.* **2016**, *63*, 187–197. [Google Scholar] [CrossRef]

12. Bottani, E.; Vignali, G. Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade. *IJSE Trans.* **2019**, *51*, 284–310. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)][[Green Version](#)]
13. Hsiao, T.-C.; Tai, K.-Y.; Huang, Y.-M.; Chung, Y.-F.; Wu, Y.-C.; Kurniati, T.; Chen, T.-S. An Implementation of Efficient Hierarchical Access Control Method for VR/AR Platform. In Proceedings of the 2018 16th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA), Stary Smokovec, Slovakia, 15–16 November 2018; pp. 205–208. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
14. Blanco-Pons, S.; Carrión-Ruiz, B.; Lerma, J.L. Augmented reality application assessment for disseminating rock art. *Multimed. Tools Appl.* **2018**, *78*, 10265–10286. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
15. Carvalho, A.; Charrua-Santos, F.; Lima, T.M. Augmented reality in industrial applications: Technologies and challenges. In Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Pilsen, Czech Republic, 23–25 July 2019; pp. 875–883. [[Google Scholar](#)]
16. Segura, Á.; Diez, H.V.; Barandiaran, I.; Arbelaz, A.; Álvarez, H.; Simões, B.; Posada, J.; García-Alonso, A.; Ugarte, R. Visual computing technologies to support the Operator 4.0. *Comput. Ind. Eng.* **2020**, *139*, 105550. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
17. Urbas, U.; Vrabič, R.; Vukašinović, N. Displaying Product Manufacturing Information in Augmented Reality for Inspection. *Procedia CIRP* **2019**, *81*, 832–837. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
18. Masood, T.; Egger, J. Adopting augmented reality in the age of industrial digitalisation. *Comput. Ind. Eng.* **2020**, *115*, 103112. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
19. Egger, J.; Masood, T. Augmented reality in support of intelligent manufacturing—A systematic literature review. *Comput. Ind. Eng.* **2020**, *140*, 106195. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
20. Halim, A.A. Applications of augmented reality for inspection and maintenance process in automotive industry. *J. Fundam. Appl. Sci.* **2018**, *10*, 412–421. [[Google Scholar](#)]
21. Bosch. Automechanika 2016: Bosch Presents Smart Solutions for Tomorrow's Workshops—Bosch Media Service. Available online: <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/automechanika-2016-bosch-presents-smart-solutions-for-tomorrows-workshops-54976.html> (accessed on 20 July 2020).
22. Lee, N. Volkswagen Develops Augmented Reality Service Manual for the XL1|Engadget. Available online: https://www.engadget.com/2013-10-01-volkswagen-augmented-reality-ipad-manual-xl1.html?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xlLmNvbS8&guce_referrer_sig=AQAAAIKcAI5FGxGR6OtBmakSg7ns3OFpQbAt1DPEWauYPBFwc3QptysG-Y31ZGh9ieUTv3KBMNSKWTy8bDPnKirqmw-7 (accessed on 28 July 2020).
23. Aziz, F.A.; Alostad, E.; Sulaiman, S.; Ahmad, K.A. Augmented reality marker based to aid inspection and maintenance process in automotive industry. *Int. J. Eng. Adv. Technol.* **2019**, *8*, 417–421. [[Google Scholar](#)]
24. Zhou, J.; Lee, I.; Thomas, B.; Menassa, R.; Farrant, A.; Sansome, A. Applying spatial augmented reality to facilitate in-situ support for automotive spot welding inspection. In Proceedings of the 10th International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry, Hong Kong, China, 11 December 2011; pp. 195–200. [[Google Scholar](#)]
25. Bosch Auto. Available online: https://fr.bosch-automotive.com/fr_FR/ (accessed on 27 July 2020).
26. Yuan, M. What Is MQTT? Why Use MQTT?—IBM Developer. Available online: <https://developer.ibm.com/articles/iot-mqtt-why-good-for-iot/> (accessed on 6 July 2020).
27. Team, H. Client, Broker/Server and Connection Establishment—MQTT Essentials: Part 3. Available online: <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-3-client-broker-connection-establishment/> (accessed on 6 July 2020).
28. Critical Manufacturing. Critical Manufacturing MES|Integrated Manufacturing Execution System. Available online: <https://www.criticalmanufacturing.com/en/critical-manufacturing-mes/overview> (accessed on 7 July 2020).
29. Critical Manufacturing. What Is MES? Available online: <https://www.criticalmanufacturing.com/en/critical-manufacturing-mes/what-is-manufacturing-execution-system> (accessed on 7 July 2020).
30. Dudkin, I. Vuforia vs. ARKit vs. Arcore: Choosing an Augmented Reality SDK—Skywell Software. Available online: <https://skywell.software/blog/vuforia-vs-arkit-vs-arcore-choosing-an-augmented-reality-sdk/> (accessed on 10 June 2019).
31. Sanket, P. Augmented Reality SDKs in 2018: Which Are the Best for Development—ARreverie Technology. Available online: <http://www.arreverie.com/blogs/best-augmented-reality-sdk-in-2018/> (accessed on 9 July 2020).
32. Demeure, A.; Sottet, J.-S.; Calvary, G.; Coutaz, J.; Ganneau, V.; Vanderdonckt, J. The 4C Reference Model for Distributed User Interfaces. In Proceedings of the 4th International Conference on Autonomic and Autonomous Systems (ICAS 2008), Gosier, France, 16–21 March 2008; pp. 61–69. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)][[Green Version](#)]
33. Vuzix. Vuzix|View the Future. Available online: <https://www.vuzix.com/support/legacy-product/m300-smart-glasses> (accessed on 10 August 2020).
34. Pérez, L.; Diez, E.; Usamentiaga, R.; García, D.F. Industrial robot control and operator training using virtual reality interfaces. *Comput. Ind.* **2019**, *109*, 114–120. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

35. Unity. Unity Official Page. Available online: <https://unity.com/> (accessed on 7 March 2022).