



Springer Link



Wang, X., Wang, J., Wu, C. *et al.* Engineering Brain: Metaverse for future engineering. *AI Civ. Eng.* 1, 2 (2022). <https://doi.org/10.1007/s43503-022-00001-z>

Сигнальный перевод 2022 г. Куприяновский В.П. [v.kupriyanovsky@rut.digital](mailto:v.kupriyanovsky@rut.digital)

#### Абстракт

В последнее десятилетие произошли заметные преобразования в отрасли архитектуры, проектирования и строительства (АЕС), при этом как в академических кругах, так и в промышленности были предприняты усилия, направленные на повышение эффективности, безопасности и устойчивости гражданских проектов. Такие достижения в значительной степени способствовали более высокому уровню автоматизации управления жизненным циклом гражданских активов в цифровой среде. Чтобы объединить все достижения, достигнутые на данный момент, и еще больше ускорить их прогресс, в этом исследовании предлагается новая теория «Инженерный мозг», эффективно использующая концепцию Метавселенной в области гражданского строительства. В частности, сначала рассматривается эволюция Метавселенной и ее ключевых вспомогательных технологий; затем представлена теория инженерного мозга, включая ее теоретические основы, ключевые компоненты и их взаимосвязи. Предлагаются перспективы реализации этой теории в секторе АЕС, как описание Метавселенной инженерии будущего. Путем сравнения между предложенной теорией инженерного мозга и Метавселенной проиллюстрированы их взаимосвязи; и то, как Инженерный мозг может функционировать как Метавселенная для будущей инженерии, изучается далее. Это исследование, дающее новаторское представление о будущем машиностроительного сектора, потенциально может привести всю отрасль к новой эре, основанной на среде Metaverse.

#### Введение

Поскольку в последние годы Индустрия 4.0 все чаще применяется в строительном секторе, трансформация происходит на протяжении всего жизненного цикла гражданских активов. Достижения как в научных кругах, так и в промышленности способствуют повышению эффективности, безопасности, устойчивости и автоматизации для успешной реализации проектов. Между тем массивные данные, собираемые и обмениваемые с помощью технологии Интернета вещей (IoT), все чаще используются для управления машинным интеллектом и поддержки принятия различных управленческих решений. Цифровизация представляет собой еще одну важную тенденцию в строительной отрасли, где информационное моделирование зданий (BIM) и цифровые двойники (DT) интенсивно применяются наряду с другими информационными технологиями для поддержки эффективного управления гражданскими активами. Существуют не только проекты, возглавляемые промышленными партнерами [например, Building 4.0 CRC в рамках программы Центра совместных исследований правительства Австралии (2020 г.)], но также предпринимаются обширные исследовательские усилия (Bock, 2015; Elghaish et al., 2020; Hautala et al., 2017), чтобы ускорить такую трансформацию строительной отрасли.

Недавно генеральный директор Facebook Марк Цукерберг обратил внимание на концепцию Метавселенной на конференции разработчиков (Zuckerberg, 2021). Ранее в этом году генеральный директор Microsoft Сатья Наделла представил идею корпоративной Metaverse на партнерском мероприятии Microsoft Inspire 2021 (Microsoft, 2021) Metaverse, предназначенном для поддержки смоделированных сред и смешанной реальности. К бурному обсуждению этой идеи в отрасли присоединились также производитель чипов Nvidia, платформы видеоигр, такие как Epic и Roblox, и даже потребительские бренды, такие как Gucci. Помимо достижений в промышленности, ученые-первопроходцы из самых разных областей предложили схожие концепции, которые имеют некоторые общие черты с Метавселенной. В частности, в секторе АЕС профессор Ван подчеркнул важность смешанной реальности в инженерной отрасли будущего (Wang, 2007a, 2007b) более десяти лет назад. Также интенсивно проводились исследования цифровых двойников и BIM как цифровой версии реальных гражданских объектов (Alizadehsalehi et al., 2020; Voje et al., 2020; Wang et al., 2015). Однако на сегодняшний день достижения в отрасли АЕС, будь то робототехника или DT, не смогли достичь такого высокого уровня единства, как Метавселенная. Результаты исследований и технологии в секторе АЕС разбросаны и должны быть интегрированы в интероперабельную «вселенную», чтобы реализовать высокоавтоматизированную, эффективную, безопасную и устойчивую среду строительства. По этой причине в данном исследовании делается попытка применить идею Метавселенной в строительной отрасли. Во-первых, он представит эволюцию и ключевые технологии Метавселенной, а затем предложит новую теорию «Инженерный мозг». Текущие достижения в строительном секторе будут систематически включаться в «Инженерный мозг» с подробными иллюстрациями. Представлены взгляды в будущее строительной отрасли, на основе которых проведен сравнительный анализ Метавселенной и Инженерного мозга. Наконец, также изучаются потенциальные адаптации Метавселенной в секторе АЕС в форме Engineering Brain.

#### Метавселенная и ее ключевые технологии

На ранних этапах эволюции Метавселенной многие схожие концепции под разными названиями были выдвинуты еще в 1980-х годах. в ряде художественных романов и некоторых массовых многопользовательских ролевых онлайн-играх (MMORPG). Термин «Метавселенная» впервые был придуман Нилом Стефенсоном в научно-фантастическом произведении «Снежная катастрофа» в 1992 году (Stephenson, 1992). Несколько хорошо известных примеров Metaverse в сфере развлечений включают Fortnite от Epic Games и Second Life от Linden Lab, где игроки могут создать для себя аватар, чтобы исследовать мир в виртуальной среде. В некотором смысле Метавселенная напоминает параллельный мир, где человеческая деятельность, происходящая в настоящее время в физическом мире, также будет происходить в цифровой среде. До сегодняшнего дня концепция Метавселенной все еще находится в процессе развития, и до сих пор не дано авторитетного определения. Тем не менее, можно определить некоторые ключевые элементы Метавселенной, включая видеоконференции, игры, электронную почту, прямые трансляции, социальные сети, электронную коммерцию, виртуальную реальность и т. д. Для реализации таких действий активы в экосистеме Метавселенной (например, аватары и ценности) должны быть совместимы, интероперабельны и передаваться между различными поставщиками и конкурирующими продуктами (Lanxon et al., 2021). Кроме того, развивающаяся Метавселенная все больше и больше касается элементов, ориентированных на пользователей, начиная от идентичности аватара, создания контента, виртуальной экономики, социальной приемлемости, присутствия, безопасности и конфиденциальности, а также доверия и подотчетности (Lee et al., 2021).

Тем не менее, все компоненты Метавселенной уже существовали, переходя от проприетарных экосистем, используемых различными конкурирующими компаниями и создателями, к универсальной и интегрированной экосистеме, все из которых являются ключом к конечному построению Метавселенной. На рис. 1 перечислены семь слоев Метавселенной (Radoff, 2021), причем промышленные партнеры на рынке сопоставлены с каждым слоем. Чтобы облегчить переход от нынешнего Интернета к Метавселенной, требуется широкий спектр ключевых технологий, и они отображаются на семи уровнях Метавселенной, как показано на рис. 1. В частности, седьмой уровень, т. е. инфраструктура, представляет базовые технологии, поддерживающие Метавселенную, в том числе: будущие мобильные сети и Wi-Fi, а также аппаратные компоненты, такие как графические процессоры (GPU). Такие технологии, как виртуальная реальность (VR), дополненная реальность (AR) и расширенная реальность (XR), попадают в слой пространственных вычислений, а соответствующие носимые устройства, такие как очки виртуальной реальности, относятся к шестому слою, то есть к человеческому интерфейсу. Уровень децентрализации связан в основном с невзаимозаменяемыми токенами (NFT) и блокчейнами. Другие технологии, такие как искусственный интеллект (ИИ), периферийные и облачные вычисления, задействованы на нескольких уровнях и важны для Метавселенной. Все вышеперечисленные ключевые технологии подробно проиллюстрированы ниже.

Рисунок 1



Семь слоев Метавселенной и карта рынка

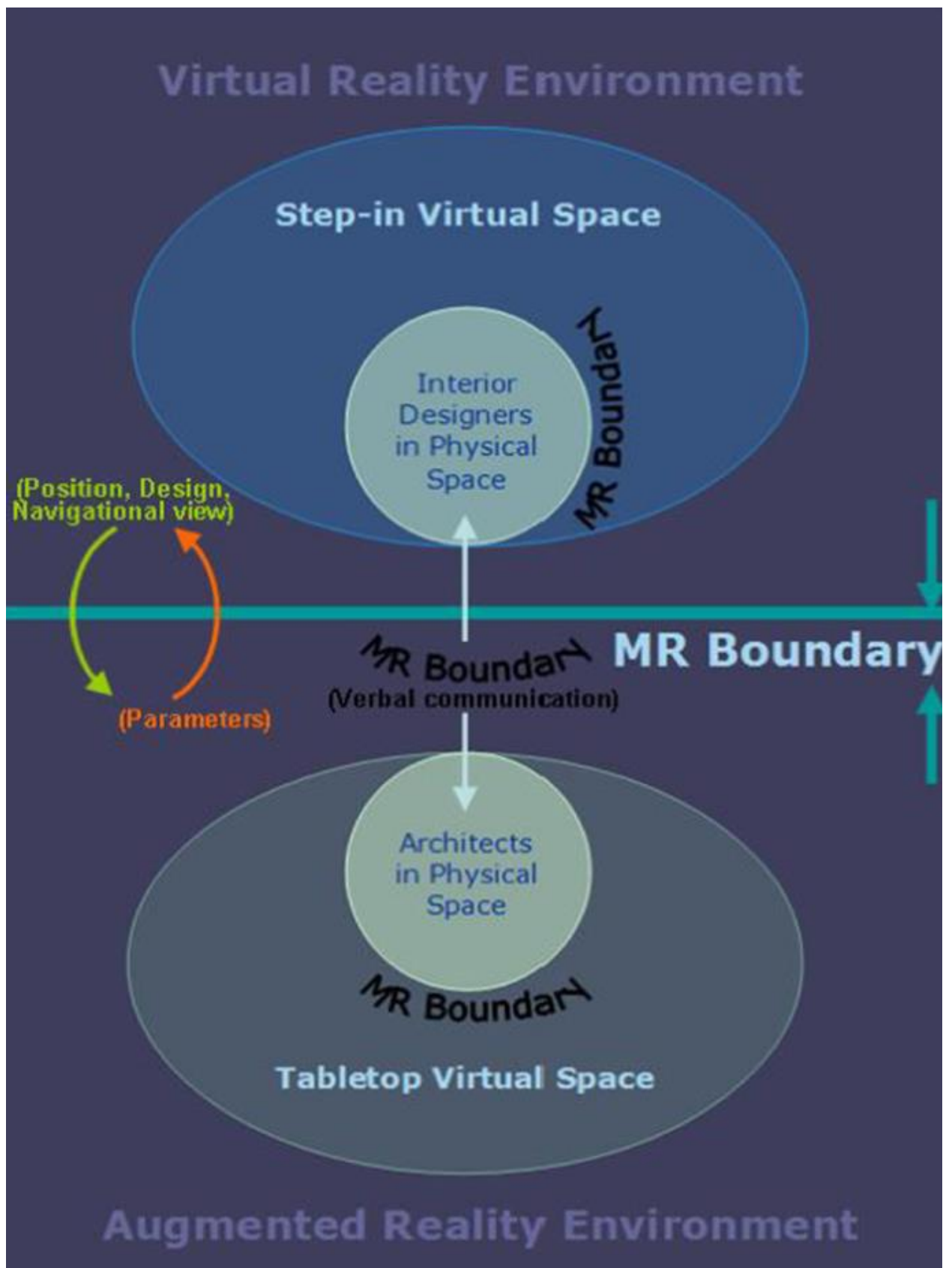
### Смешанная реальность (MR)

За последние десятилетия появились и получили широкое развитие различные концепции «реальности», включая искусственную реальность, виртуальную реальность, смешанную реальность, дополненную реальность, дополненную виртуальность, опосредованную

реальность, уменьшенную реальность, усиленную реальность и т. д. Стоит отметить, что хотя их различия незначительны, правильное разъяснение, данное Wang (2007a), полезно. Смешанная реальность (MR) вместе с виртуальной реальностью (VR) и дополненной реальностью (AR) относятся к расширенной реальности (XR) — общему термину, охватывающему несколько иммерсивных технологий. Благодаря этим технологиям могут быть доставлены различные уровни виртуальности, от частичных ощущений до иммерсивного опыта. Если быть точным, с технологией дополненной реальности реальная среда может быть перекрыта сенсорными модальностями, будь то конструктивными или деструктивными, в то время как где-либо познание в отношении окружения может быть изменено соответствующим образом. С другой стороны, с технологией VR пользовательскую среду можно заменить виртуальной и смоделированной. Что касается MR, то он допускает сосуществование и взаимодействие физических и виртуальных объектов; и его приложения не находятся ни в виртуальном, ни в физическом мире, а где-то посередине континуума реальность-виртуальность. Существует два подрежима MR, то есть дополненная реальность (AR) и дополненная виртуальность (AV): первый используется для дополнения реальной среды виртуальной информацией, а второй встраивает реальное содержимое в виртуальный мир. Помимо отдельных AR и AV, возможны многие другие режимы в контексте континуума «реальность-виртуальность» (RV). Например, в рамках взаимного увеличения (MA), предложенного профессором Вангом (2007b), «реальные и виртуальные сущности взаимно дополняют друг друга, чтобы сформировать разные дополненные ячейки/пространства». В результате может быть сформировано мегапространство, в котором переплетаются реальное и виртуальное пространство для беспрепятственного сотрудничества между различными заинтересованными сторонами. Для реализации мегапространства был предложен процесс рекурсивного расширения между виртуальными пространствами и пространствами реальности.

Обширные реализации XR на были разработаны в сфере развлечений, образования (Zweifach et al., 2019), здравоохранения (Andrews et al., 2019; Silva et al., 2018), туризма (Kwok et al., 2021), промышленного производства (Fast -Berglund et al., 2018), дизайн интерьера и архитектура. Развертывание XR в отрасли АЕС также все больше изучается (Alizadehsalehi et al., 2020; Khan et al., 2021; Wang, 2007a, 2007b) в отношении не только этапов жизненного цикла гражданских активов, но и проекта. управленческое и профессиональное обучение. Примечательно, что профессор Ван (2007a) предложил Смешанное пространство проектирования (MDS) для создания среды совместного проектирования как для архитекторов, так и для дизайнеров интерьеров на основе теории границ смешанной реальности, предложенной Бенфордом и др. (1996). Три измерения составляют границы смешанной реальности, в том числе: транспорт (аналогично концепции погружения в виртуальную реальность), искусственность и пространственность. На рис. 2 представлены основные теории и соответствующая передача данных в предлагаемой MDS. В таблице 1 перечислены свойства границ MR и то, как они реализованы в предлагаемой MDS. Прототип MDS был предложен для проверки.

Рис.2



Теория границ MR во взаимном контексте (Wang, 2007a)

Таблица 1 Свойства границы MR и их реализация в MDS



From: [Engineering Brain: Metaverse for future engineering](#)

MR boundary's properties	Definition	Implementation in MDS
Mutual awareness	Potential effects that an MR boundary may have on awareness	Avatar of interior designer The view slaving mechanism Voice communication between two adjoining spaces
Directionality	Bi-directional/One-directional	Directional control for data transmission and interaction
Interaction within boundaries	Participants on both side of the boundary might control the effects (e.g., transparency) to reconfigure the ways of communication	The view slaving mechanism
Interaction across boundaries	Participants in one space can manipulate objects located in another connected space	
Group interactions	At a time, only one person on behalf of the group can interact with the MR boundary, and others are enforced as passive audiences	The view slaving mechanism
Spatial frames	Mapping between AR and VR environments	The view slaving mechanism and shared interface

## Искусственный интеллект

Искусственный интеллект (ИИ) относится к подходу к обучению машин для выполнения задач, которые обычно выполняются человеческим интеллектом. Благодаря надлежащему процессу обучения в определенных средах «интеллектуальные агенты» смогут предпринимать действия с максимальными шансами на достижение своих конкретных целей (Legg et al., 2007; Poole et al., 1998). С тех пор как ИИ был основан как академическая дисциплина в 1956 году, подходы к исследованиям ИИ претерпели значительные изменения: от поиска оптимизации (например, генетических алгоритмов и алгоритмов роя), логики и вероятностных алгоритмов (например, байесовских сетей, скрытых марковских моделей и алгоритмов принятия решений). теория), машинному обучению и нейронным сетям. Благодаря наличию высокопроизводительных компьютеров и больших объемов данных в настоящее время в этой области доминирует глубокое обучение, учитывая его точность и эффективность, в то время как исследовательские усилия, направленные на глубокое обучение, резко возросли. ИИ широко используется в поисковых системах, таргетированной рекламе, системах рекомендаций, интеллектуальных личных помощниках (например, Siri), автономных транспортных средствах, играх и других системах. Наряду с широким применением ИИ также поднимались вопросы, связанные с его этическими обязанностями.

## Компьютерное зрение

По сути, это междисциплинарный предмет, компьютерное зрение стремится походить на человеческие зрительные системы и получать понимание из изображений. Задачи в этой области включают (трехмерную) реконструкцию сцены, обнаружение объектов, отслеживание объектов, оценку трехмерных поз, восстановление изображений и т. д. Типичная система компьютерного зрения в недавних исследованиях использует комбинацию методов обработки изображений для извлечения признаков и алгоритмов машинного обучения. затем используется для получения знаний на основе таких признаков. А с появлением глубокого обучения точность и эффективность систем компьютерного зрения были повышены для нескольких эталонных наборов данных и различных задач (например, классификации, обнаружения объектов и сегментации) (Pratanik et al., 2021; Ren et al., 2015). ; Ван, Йе и др., 2021). Реализации компьютерного зрения варьируются от управления дорожным движением (Buch et al., 2011), сельского хозяйства и пищевой промышленности (Brosnan et al., 2004; Tian et al., 2020), управления жизненным циклом гражданских активов (Feng et al. , 2018; Xu et al., 2020) и диагностики заболеваний (Bhargava et al., 2021; Song et al., 2016).

## Пограничные и облачные вычисления

Облачные вычисления реализуют предоставление услуг через облака, включая программное обеспечение, аналитику, хранилище данных и сетевые ресурсы. В настоящее время облачные вычисления используются во многих повседневных делах, а облачные услуги можно приобрести как «инфраструктура как услуга» (IaaS), «платформа как услуга» (PaaS) или «программное обеспечение как услуга» (SaaS). Они обеспечивают безопасное хранение данных, обеспечивают непрерывность бизнеса и улучшают совместную работу. Однако, столкнувшись с ростом IoT, эксплуатационные расходы на облачные вычисления становятся проблемой. Для решения этой проблемы предлагаются граничные вычисления, которые, по сути, должны вывести вычислительные ресурсы на «край» сетей, чтобы они были ближе к пользователям или устройствам. Таким образом можно уменьшить задержку и повысить эффективность работы. Растущее число приложений реального времени, таких как видеоаналитика, среда умного дома и умные города, выиграют от граничных вычислений для сокращения времени отклика (Shi et al., 2016).

### Будущие мобильные сети

Технология сотовой связи пятого поколения, то есть 5G, жизненно важна для развития Метавселенной. Проект партнерства 3-го поколения (3GPP), глобальная организация, которая определила и поддерживает спецификации для 2G GSM, 3G UMTS и 4G LTE, опубликовала выпуск 15 (3GPP, 2018), первый полный набор стандартов 5G в 2018 году. Согласно выпуску, сотовая связь 5G New Radio (NR) будет обеспечиваться с использованием двухканальных методов кодирования, то есть проверки на четность с низкой плотностью (LDPC) (Gallager, 1962) и полярный код (Арикан, 2009). По сравнению со своими предшественниками технология 5G позволяет увеличить трафик данных как на мобильных устройствах, так и в сетях, обеспечивает более широкую полосу пропускания до частот ниже 6 ГГц и миллиметровых волн и, таким образом, может обеспечить более высокие эксплуатационные характеристики, например, сверхнизкую задержку, более высокую надежность и более высокие пиковые данные. ставки. Основываясь на трех пользовательских сценариях, определенных 3GPP, т. е. расширенной мобильной широкополосной связи (eMBB), массивной связи машинного типа (mMTC) и сверхнадежной связи с малой задержкой (URLLC), технология 5G теперь может предоставлять новые услуги более широкий круг пользователей в таких областях, как автомобильная промышленность, Индустрия 4.0, образование, здравоохранение, радиовещание и т. д. Кроме того, для облегчения связи между массивными подключенными устройствами в рамках IoT технология 5G обеспечивает плотность соединения при приемлемом энергопотреблении. Основываясь на достижениях и потенциале, прогнозируется, что расширяющийся рынок технологий 5G зафиксирует совокупный годовой темп роста в 70,83% в следующие несколько лет.

### Non-Fungible Token (NFT) и блокчейн

Блокчейн и криптовалюта играют важную роль в Метавселенной, потому что данные в блокчейне могут повысить уникальную характеристику, то есть доказательство существования, которое никогда не может быть перезаписано, что позволяет с уверенностью отслеживать данные. Чтобы еще больше улучшить отслеживаемость обменных операций между операторами в цепочке поставок, товары токенизируются. NFT, инициированный в блокчейне Ethereum и теперь ставший отдельным новым классом активов в других криптовалютах (Dowling, 2021), применялся в творческой индустрии (Chevet, 2018), постоянно развивающейся игровой индустрии (например, криптоигры, такие как CryptoCats), Gods Unchained и TradeStars) и многих других секторах. Такие токены можно использовать для утверждения права собственности на товары в определенный момент времени, поддержки передачи на открытом рынке и гарантии их подлинности.

Варианты использования, облегчаемые NFT и блокчейном, включают игры, участие в виртуальных мероприятиях и торговлю виртуальными активами (Wang, Li, et al., 2021), которые в значительной степени вносят свой вклад в Метавселенную.

## Инженерный мозг

### Теоретические основы

Теоретически Engineering Brain охватывает нейронауку и нейронную инженерию, бионику и киберфизические системы в области компьютерных наук.

### неврология

Нейронаука — это научное исследование нервной системы, представляющее собой междисциплинарную науку, объединяющую физиологию, анатомию, молекулярную биологию, цитологию и математическое моделирование с целью понять фундаментальные и возникающие свойства нейронов и нейронных цепей. В частности, нейробиология исследует, как цифровые сигналы проходят через человеческий мозг, какие области мозга отвечают за какие функции тела и как различные области мозга взаимодействуют друг с другом при выполнении сложных мыслей и задач (Squire et al., 2012). В области нейробиологии важным открытием является механизм дивергентно-конвергентного мышления, тесно связанный с механизмом инженерного мозга. В мозгу человека есть много областей, включая затылочную долю, теменную долю и лобную долю; каждая область влияет на одну или несколько основных функций. Например, затылочная доля влияет на зрительное восприятие; и когда человек принимает решения или занимается творческой работой, различные области мозга будут активно и эффективно взаимодействовать (Goldschmidt, 2016). Тем не менее, эти взаимодействия включают два доминирующих типа мышления: дивергентное мышление и конвергентное мышление. Первый отвечает за сбор информации или знаний с разных точек зрения, и такая информация ограничивается знаниями в предметной области, которыми обладает человек. Последний, с другой стороны, принимает окончательные решения на основе результатов первого (Chermahini et al., 2012). Неврология формирует основу для различных междисциплинарных секторов, включая нейронную инженерию, которые имеют схожие рабочие механизмы и закладывают основу инженерного мозга.

### Нейронная инженерия

Нейронная инженерия (или инженерия человеческого мозга) опирается на области вычислительной нейронауки, экспериментальной нейробиологии, неврологии, электротехники и обработки сигналов живой нервной ткани, включая робототехнику, кибернетику, компьютерную инженерию, инженерию нервной ткани, материаловедение и нанотехнологии. Нейронная инженерия направлена на разработку методов и устройств для захвата, мониторинга, интерпретации и даже управления сигналами мозга для получения целенаправленных ответов. Нейронная инженерия может принести много пользы в области медицины, здравоохранения и игр. Его типичные достижения включают, но не ограничиваются: (1) нейронной визуализацией, с помощью которой нейронные методы (например, функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ) и магнитно-резонансная томография (МРТ)) используются для могут структуры мозга и деятельность нейронных сетей; (2) интерфейсы мозг-компьютер, которые стремятся обеспечить прямую связь с нервной системой человека, чтобы контролировать и



стимулировать нейронные цепи, а также диагностировать и лечить нервные дисфункции; и (3) нервные протезы, которые относятся к устройствам, которые дополняют или заменяют недостающие функции нервной системы.

## Бионика

Понятия «Инженерный мозг» также ссылаются на знания бионики. Бионика, также известная как инженерия, вдохновленная биологией, представляет собой применение биологических методов и систем, встречающихся в природе, для изучения и проектирования инженерных систем и современных технологий. Философия бионики заключается в том, что передача технологий между формами жизни и искусственными объектами желательна, поскольку эволюционное давление обычно заставляет живые организмы (фауну и флору) оптимизироваться (Abutakeer et al., 2017). Бионика вдохновила на рождение многих современных технологий, которые были развернуты в строительстве и машиностроении. Такие современные методы включают, но не ограничиваются: (1) робототехникой, с помощью которой бионика используется для применения способов движения животных в конструкции роботов, например, роботов-собак от Boston Dynamics, которые могут выполнять опасные инспекционные задачи. инженерам-людям; (2) то, как крылья синей бабочки-морфо отражают свет, имитируется для изобретения RFID-меток, которые могут эффективно считывать данные о материалах, оборудовании и рабочей силе; и (3) информационные технологии, например, алгоритмы оптимизации, основанные на социальном поведении животных (например, оптимизация колонии муравьев) и оптимизация роя частиц (Zang et al., 2010).

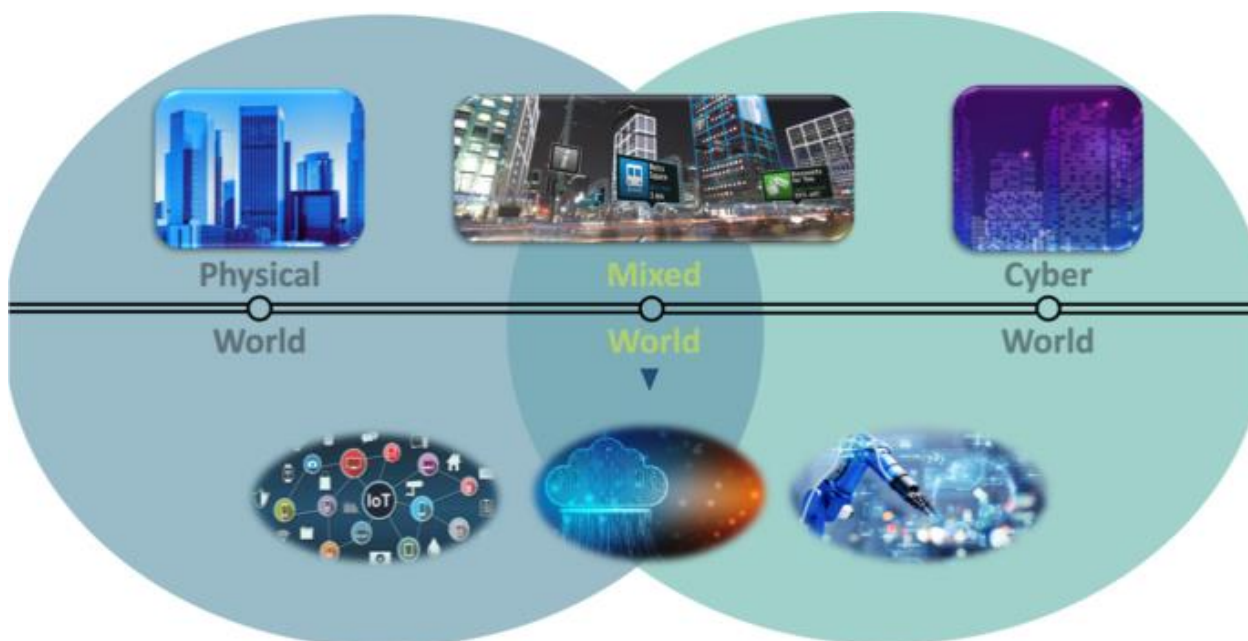
Инженерный мозг можно рассматривать как расширение и специализацию нейронауки, нейронной инженерии и бионики в инженерных проектах. Как обсуждается ниже, он основан на своевременном сборе, интерпретации и анализе данных с использованием передовых методов ИИ (аналогично восприятию и пониманию окружающей среды и вынесению суждений человеческим мозгом), обмену данными между различными аналитическими функциями и участниками проекта (аналогично передаче данных). сигналы между областями мозга), а также контроль или инструктирование физических объектов в проектах (например, машин и людей) путем своевременной отправки информации, связанной с принятием решений (аналогично управлению частями тела). У человека сосуществуют области мозга и тела; однако применение инженерного мозга в практических проектах должно иметь дело с отдельными неорганическими сущностями, а также с взаимодействием между такими сущностями и органическими инженерами-людьми. Следовательно, реализация Engineering Brain также влечет за собой концепцию киберфизических систем из области компьютерных наук.

## Киберфизическая система (CPS)

CPS фактически является синонимом популярного понятия «цифровой двойник» (DT), которое фокусируется на создании кибермира (или виртуального мира) физического мира (Boje et al., 2020). Как показано на рис. 3, CPS включает в себя три мира: физический, кибер- и смешанный миры. Для разработки CPS необходимо собирать все типы данных, описывающих физический мир, с использованием различных методов, таких как системы IoT (для сбора показаний датчиков), камеры (для сбора изображений) и аудиомикрофоны (для сбора голосов и языков). (Гош и др., 2020). Все мультимодальные данные хранятся, обрабатываются и анализируются в киберпространстве, выполняется моделирование и оптимизация, а также принимаются

обоснованные решения в соответствии с представленной ранее философией пирамиды данных. Затем действия могут выполняться, следуя оптимальным решениям в физическом мире. Чтобы повысить эффективность работы, следует использовать определенные технологии, такие как AR / VR, для проецирования необходимой информации в физическом мире (таким образом формируя смешанный мир), чтобы направлять выполнение этих задач (Li et al., 2018). Таким образом, задачи или проекты в физическом мире могут выполняться с минимальными рисками, получая при этом максимальные выгоды или прибыль.

Рис. 3



Киберфизическая система

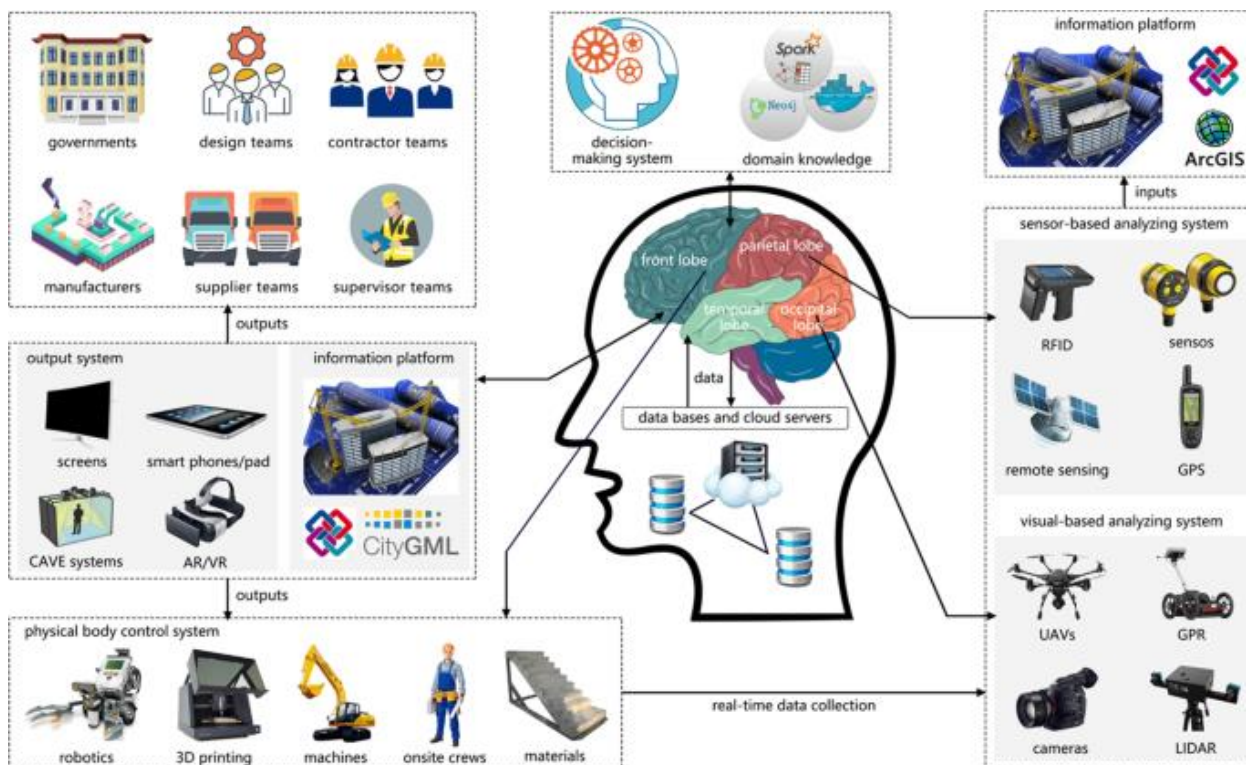
#### Определение и компоненты инженерного мозга

Инженерный мозг определяется как эффективная и интеллектуальная киберфизическая система для реализации оптимизированного принятия решений по строительным проектам на основе разнородных, мультимодальных данных и данных жизненного цикла с использованием современных междоменных технологий. Рабочий механизм инженерного мозга относится к взаимодействию между областями человеческого мозга.

Как показано на рис. 4, инженерный мозг включает четыре ключевых компонента: (1) лобную долю, (2) затылочную долю, (3) теменную долю и (4) височную долю. Цель Engineering Brain — создать облачную рефлекторную дугу для своевременного и эффективного решения всех технических вопросов, чтобы проект можно было завершить без задержек и аварий, обеспечивая при этом более высокое качество и экономя больше затрат. Механизм работы инженерного мозга аналогичен механизму реального человека: четыре доли обрабатывают разные типы данных (т. е. осуществляют дивергентное мышление), а верхняя часть лобной доли делает точные прогнозы и решения (т. е. использует конвергентное мышление). В частности, данные обо всех аспектах проекта собираются и обрабатываются непрерывно (т. е. преобразование данных в информацию); используются разные методы для анализа

информации разных типов; полученная информация/знания обмениваются и отправляются в верхнюю лобную извилину для предсказания и принятия решения; окончательные результаты (часто выраженные в виде инструкций) отправляются объектам проекта (например, машинам или бригадам) для выполнения определенных задач в физическом мире.

Рис.4



### Концептуальная основа инженерного мозга

#### Теменная доля

Теменная доля отвечает за обоняние и осязание людей. Поэтому в какой-то степени это соответствует системе IoT, собирающей в режиме реального времени показания с различных типов датчиков, такие как информация о состоянии машин (например, с навесных датчиков), рабочих (например, с носимых датчиков), и окружающей среды (например, от стационарных датчиков) (Gamil et al., 2020). Данные, собранные с разных датчиков, обычно различаются по многим параметрам, например по формату и объему, что может мешать последующему анализу. Следовательно, для интеграции данных должны быть приняты методы объединения данных, включая традиционные методы фильтрации (например, фильтр Калмана) и передовые методы кодирования (например, преобразователь BERT), в зависимости от типов данных. Все данные датчиков важны для мониторинга в режиме реального времени и долгосрочного извлечения знаний. Первый относится к обнаружению аномалий и дефектов путем определения обычных показаний, часто с использованием различных методов диагностики неисправностей (Riaz et al., 2017); последнее относится к обнаружению общих закономерностей или знаний для постоянного улучшения, например, к выявлению профилей использования энергии пользователями для оптимизации управления объектами (Alcalá et al., 2017). Однако показания датчиков являются структурированными данными, тогда как 80% данных в строительных

проектах являются неструктурированными, например, в виде изображений и текстов. Поэтому очень важно собирать неструктурированные данные.

#### Затылочная доля

Затылочная доля обрабатывает визуальные сигналы в человеческом мозгу, чтобы люди могли видеть. Таким образом, в Engineering Brain его функция соответствует сбору изображений на месте с использованием RGB-камер и камер глубины, а затем реализации определенных методов анализа в секторе компьютерного зрения (CV) для обработки этих изображений. Такие методы включают в себя как традиционные методы CV, такие как обнаружение смещения на основе опорных точек и коррекция цифрового изображения (в основном для мониторинга конструкции) (Wu et al., 2020), так и усовершенствованные сверточные нейронные сети (CNN), предназначенные для выполнения различных функций, таких как распознавание хода строительства строительных конструкций, обнаружение и оценка дефектов (например, трещин), а также выявление рабочих, машин или небезопасного поведения (Ding et al., 2018; Han et al., 2013). Кроме того, люди воспринимают текстовые данные посредством зрительного восприятия (т. е. при чтении). Таким образом, в Engineering Brain «доля» также отвечает за сбор текстовых данных путем «чтения» документов проекта, хранящихся в файловых системах, путем использования наивных методов предварительной обработки естественного языка, таких как разбиение предложений, токенизация (т. е. разделение предложения на части). фразы) и лемматизация (то есть преобразование слов в их основные формы, выраженные в словарях) (Denny et al., 2018). Текстовые данные можно использовать для получения знаний (например, для определения причин аварии и задержки) и проверки соответствия (например, для выявления несоответствия между проектом, его рабочим планом и опубликованными стандартами) (Айхан и др., 2019; İlal et al. др., 2017).

#### Височная доля

Что касается памяти, височная доля — это место, где находится гиппокамп. Как таковая доля соответствует функции хранения информации. Необходимо разработать базы данных как для структурированных, так и для неструктурированных данных. Структурированные данные можно легко хранить в таблицах со строками и столбцами. В этом случае типичные реляционные базы данных (например, Oracle и DB2) могут удовлетворять требованиям на практике. Однако для повышения эффективности хранения данных можно использовать архитектуру распределенной базы данных, в которой отдельные базы данных создаются для разных форматов данных. Другой вариант — базы данных NoSQL (например, MongoDB и Apache Cassandra), которые обеспечивают лучшую масштабируемость при обработке больших данных и могут более эффективно хранить массивные показания датчиков и изображения. Кроме того, некоторые неструктурированные данные (например, сущности и их отношения, которые часто извлекаются из текстовых документов) принимают форму троек (например, субъект-отношение-объект). Следовательно, для хранения таких данных можно использовать базы данных графов, например Neo4j и Protégé (Jeong et al., 2019; Wu et al., 2021c).

#### Лобная доля

Лобная доля состоит из трех извилин, каждая из которых отвечает за свою функцию. Верхняя лобная извилина включает конвергентное мышление (то есть прогнозирование и принятие решений). Следует отметить, что многие цели (например, улучшение качества и сокращение

сроков) в строительном проекте противоречивы, поэтому одно решение может вызвать каскадные эффекты и повлиять на них все. Таким образом, крайне важно использовать многоцелевые методы оптимизации (например, генетический алгоритм, оптимизация роя частиц и обучение с подкреплением), чтобы найти баланс между этими целями. Что касается прогнозирования, модели машинного обучения и глубокого обучения являются хорошими вариантами, поскольку они продемонстрировали свою эффективность во многих приложениях, например, для прогнозирования потребности в материалах для размещения заказов или прогнозирования эффективности для выбора участников торгов (Kim et al., 2019). Прогнозы и решения принимаются с учетом информации и знаний, доступных из всех четырех долей. Более того, в области компьютерных наук было предложено множество методов и алгоритмов. Тем не менее, ключевой момент заключается в том, чтобы объединить знания отрасли, чтобы методы и алгоритмы соответствовали требованиям строительных проектов.

Средняя лобная извилина отвечает за речь. Следовательно, это соответствует функции обмена информацией/знаниями в инженерном мозгу как средству прогнозирования, принятия решений и выполнения проекта. Однако в отрасли отсутствуют эффективные методы обмена, и эта ситуация считается основным препятствием для внедрения ИТ. Таким образом, стандартизированные схемы, например, отраслевой фундаментальный класс (IFC), могут быть разработаны и внедрены среди заинтересованных сторон в одном проекте или даже во всей отрасли, так что информация может быть описана в одном и том же формате и может быть использована в различных инструментах (Bradley et al. и др., 2016; Чжу и др., 2019). Кроме того, семантические веб-технологии, такие как онтологии и логические рассуждения, могут быть приняты для дальнейшей стандартизации описания информации/знаний, например, для устранения неоднозначности (Wu et al., 2021c). Этот лепесток также отвечает за: (1) отправку информации и инструкций, связанных с прогнозированием/решением, для руководства или инструктирования субъектов в физических проектах, и (2) обмен информацией/знаниями с внешними сторонами, например, правительствами и производителями. Во всех случаях информационные платформы, например, BIM и CIM, могут служить для пользователей интерфейсом для поиска информации, а современные технологии взаимодействия человека и машины, такие как мобильные вычисления, дополненная и виртуальная реальность, могут использоваться для ускорения коммуникации. эффективность (Li et al., 2018).

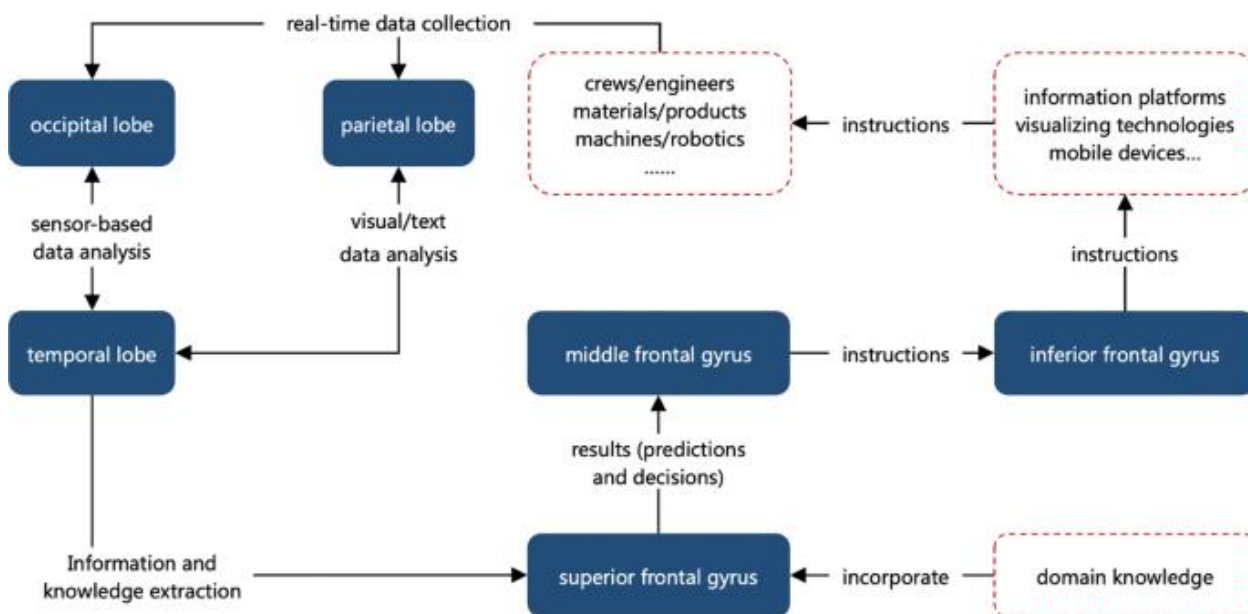
Наконец, нижняя лобная извилина относится к модулю выполнения задач, а именно к телу, которое получает приказы от мозга. В строительных проектах «извилины» относятся к объектам физического проекта, которые: (1) образуют постоянные части физической конструкции здания, например, материалы и продукты; и (2) требуется для выполнения задач по проектированию, проектированию, строительству и техническому обслуживанию. Это включает в себя бригады с разным опытом и навыками, программы проектирования зданий, строительные машины и инженерные методы. Команды проекта должны управлять всеми объектами в соответствии с прогнозами и решениями, сделанными верхней извилиной и отправленными средней извилиной, такими как выбор оптимального дизайна, перераспределение ресурсов и устранение выявленных опасностей (Wu et al., 2021b; Ю. и др., 2015).

#### Взаимодействие и развитие компонентов Engineering Brain

Как упоминалось выше, дивергентное и конвергентное мышление требует взаимодействия между областями мозга. В инженерном мозгу это соответствует потокам информации между

четырьмя лепестками. Теменная и затылочная доли будут собирать, предварительно обрабатывать и анализировать данные, собранные датчиками, а также изображения и тексты. Все данные, информация и знания, сформированные при анализе информации (т. е. дивергентном мышлении), отправляются и хранятся в височной доле, центре обмена информацией и знаниями, которые затем отправляются в верхнюю лобную извилину для прогнозирования и принятия решений. чтобы обеспечить обмен между теменной и затылочной долями, поскольку для анализа в одной доле могут потребоваться данные из другой. Например, для оценки риска с работником может потребоваться анализ поведения (с использованием CV) и отслеживание местоположения (с использованием носимых GPS). Верхняя лобная извилина получает интегрированную информацию/знания от височной доли, чтобы делать прогнозы и принимать решения, а результаты отправляются обратно в височную долю, которая затем отправляет инструкции в среднюю лобную извилину, которая, в свою очередь, информирует сущности в физическом мире. Результаты прогнозирования и принятия решений (например, прогресс проекта после перераспределения ресурсов) собираются инженерным мозгом для следующего раунда анализа, таким образом образуя замкнутый цикл и обеспечивая непрерывное совершенствование. Рисунок 5 демонстрирует вышеописанное взаимодействие в инженерном мозгу.

Рис. 5



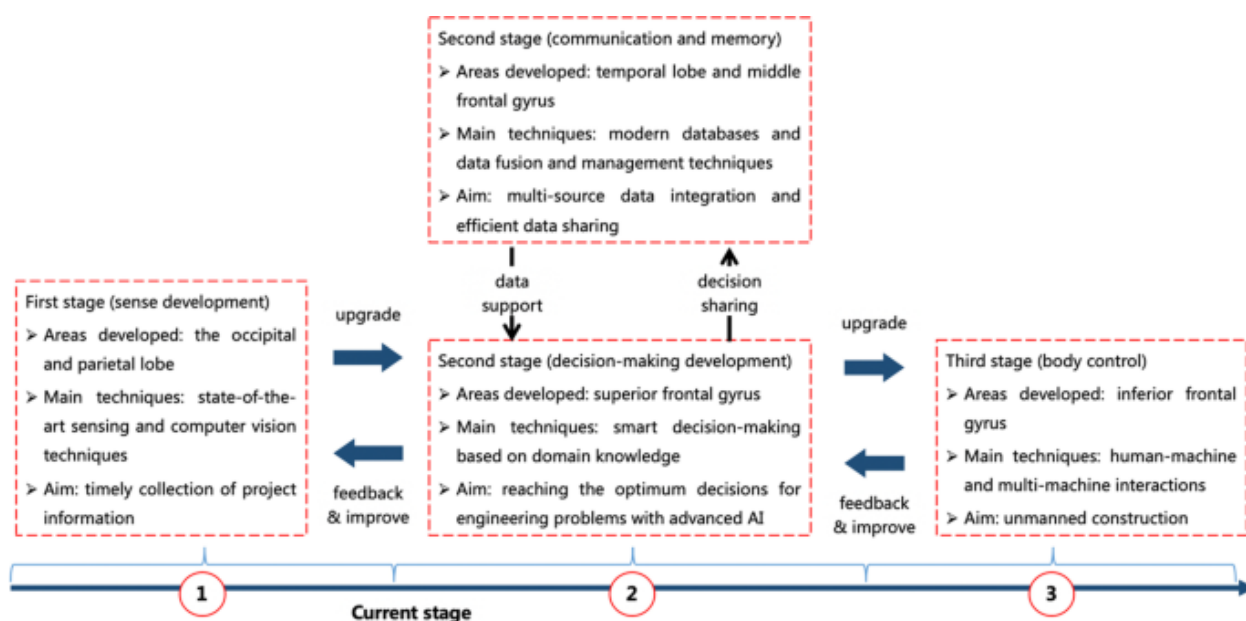
Взаимодействие между компонентами Engineering Brain

Несмотря на огромную ценность, внедрение Engineering Brain в проекты на практике требует процесса разработки, включающего в себя три основных этапа. Данные высокого качества являются необходимым условием для любого анализа, основанного на данных. Таким образом, на первой стадии быстро развиваются теменная и затылочная доли. Основные опасения по этому поводу в включают: (1) развертывание и оптимизацию систем IoT, а также методов сбора изображений и текстовых данных, которые могут охватывать как можно больше аспектов проекта при минимальных затратах на мониторинг (например, количество и энергопотребление датчиков) ( Чжоу и др., 2019 г.); и (2) разработка новых методов мультимодальной очистки и объединения данных. На втором этапе одновременно могут выполняться два действия. Во-первых, в теменной и затылочной долях должны быть реализованы передовые методы сбора



данных с датчиков, методы CV и NLP для получения полезных знаний из информации разных типов. Во-вторых, в височной доле должны быть разработаны методы стандартизации, хранения и обмена информацией и знаниями. На третьем этапе фокус развития перемещается на верхнюю и среднюю лобные извилины, где можно применять передовые методы оптимизации и модели глубокого обучения для прогнозирования и принятия обоснованных решений. Наконец, на четвертой стадии развиваются средняя и нижняя лобные извилины. Первый отправляет инструкции командам на месте, а второй получает такую информацию и физически выполняет задачи для завершения проекта. Следует отметить, что сильно развитая нижняя доля является основой для робототехники, а беспилотные машины и роботы (например, беспилотные экскаваторы, краны и летательные аппараты) широко используются для помощи (а не для замены) человеческого труда (Wu et al. , 2016). На рис. 6 представлен процесс эволюции теории инженерного мозга.

Рис. 6

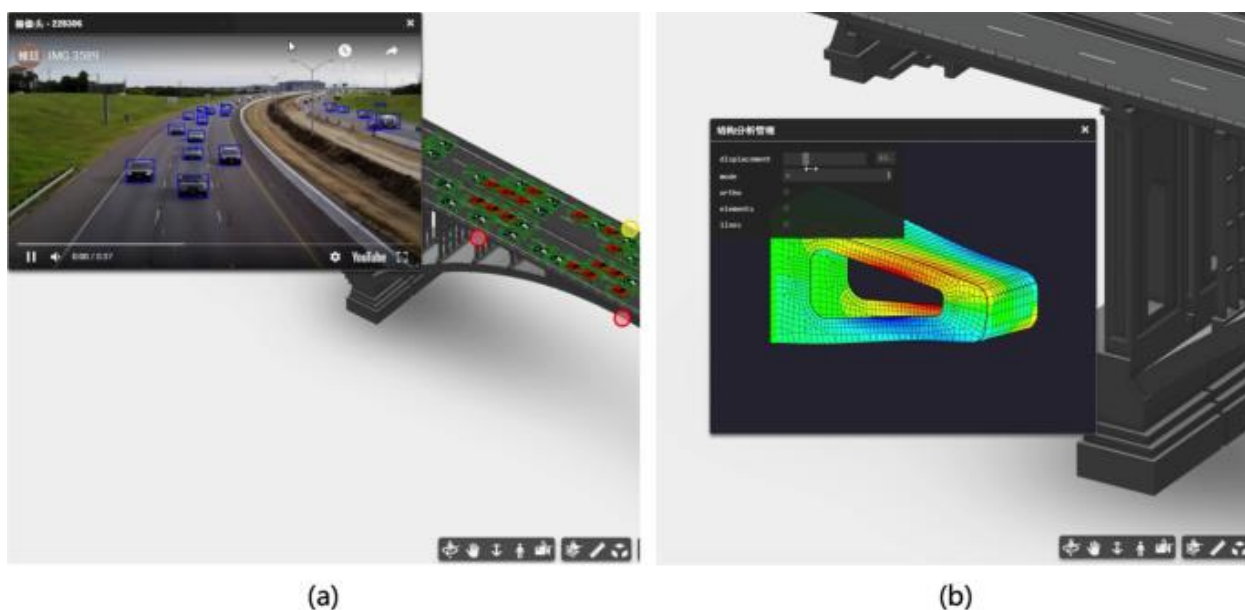


### Развитие инженерного мозга

Для облегчения понимания на рис. 7 показана простая демонстрация инженерного мозга для технического обслуживания моста. Для определения состояния конструкции сенсорная система непрерывно собирает данные из нескольких источников, в том числе с RGB-камер, принадлежащих затылочной доле инженерного мозга, а также различных датчиков (например, ускорителей и тензодатчиков), принадлежащих теменной доле. Датчики собирают основные отклики конструкции, которые затем очищаются и передаются в некоторые математические и механические модели (например, анализ методом конечных элементов) для оценки общего состояния моста. Камеры RGB собирают изображения проезжающих транспортных средств, при этом транспортные средства со значительным риском (например, тяжелые грузовики) идентифицируются, а их влияние на конструкцию оценивается. Затем модели глубокого обучения и методы оптимизации, относящиеся к верхней лобной извилине, будут объединять все первоначальные результаты анализа для оценки состояния структуры (например, индекса) с

планами профилактического обслуживания, рекомендованными с использованием рассуждений, основанных на конкретных случаях.

Рис. 7



Простая демонстрация применения Engineering Brain для технического обслуживания мостов: (a) мониторинг в режиме реального времени и (b) оценка состояния конструкции.

#### Перспективы Метавселенной в будущей инженерии

В этом разделе представлено несколько взглядов на применение Метавселенной в инженерных разработках будущего по мере того, как революция в отрасли АЕС продолжается. Будут обсуждаться три аспекта: интеллектуальное сочетание интеллектуальных технологий; интеллектуальное распознавание рассуждений и принятие решений на основе графа знаний; и взаимодействие нескольких машин/человека и машины.

#### Интеллектуальное сочетание интеллектуальных технологий

Одна из будущих перспектив Engineering Brain — интеллектуальное сочетание интеллектуальных технологий, ориентированное на спрос. В настоящее время разработано более сотни видов интеллектуальных технологий, и количество технологий продолжает увеличиваться. В настоящее время правильный выбор и сочетание этих технологий в значительной степени основаны на характеристиках проектов, а также на человеческих навыках и опыте, что делает их чрезвычайно трудоемкими и неэффективными. Поэтому разработка ориентированного на спрос проекта интеллектуального выбора и сочетания интеллектуальных технологий является актуальной.

Это направление развития вдохновлено переопределением искусственных материалов. Считается, что материалы в основном созданы руками человека. Например, стекло, пластик, бетон и т. д. пропорционально синтезируются с несколькими элементами таблицы Менделеева. Однако предполагается, что будущие искусственные материалы будут свободно настраиваться и производиться с помощью 3D-печати в соответствии с определенными требованиями с

интеллектуально интегрированными основными элементами, возможно, без присущих им форм или названий. Эта концепция дает большое вдохновение для будущих исследований в области инженерии и инженерного мозга.

Аналогичным образом предлагается схематическая диаграмма «периодической таблицы интеллектуальных технологий», иллюстрирующая идею ориентированного на спрос интеллектуального сочетания интеллектуальных технологий, как показано на рис. 8. В частности, такие интеллектуальные технологии, как AR, VR, GIS, BIM, AI, 5G, RFID и 3D-печать могут быть организованы и заполнены периодической таблицей этой технологии в соответствии с определенными правилами. Таблица является динамической и открыта для добавления или удаления интеллектуальных технологий в соответствии с различными требованиями. Оптимальная конфигурация и динамические закономерности будут выяснены с постоянным и повторяющимся экспериментами и тестами, основанные на различных инженерных сценариях. Наконец, в соответствии с техническими требованиями инженерный мозг будет разумно выбирать и интегрировать необходимые интеллектуальные технологии из этой таблицы для решения реальных инженерных задач. Например, если есть проект по строительству моста или умной мобильности, который требует включения нескольких технологий, то запрос может быть предложен к «периодической таблице технологий». Следовательно, в таблице будут представлены отзывы о выборе и сочетании интеллектуальных технологий, чтобы разумно формировать определенные субинженерные мозги в соответствии с заданными инженерными сценариями. Следует отметить, что схематическая диаграмма на рис. 8 является лишь воображаемой картиной, служащей вдохновляющей картой для будущих исследований.

Рис. 8



Интеллектуальное сочетание интеллектуальных технологий, ориентированное на спрос (схематическая диаграмма)

## Интеллектуальное распознавание рассуждений и принятие решений на основе графов знаний

Современные подходы к ИИ (например, аналитика больших данных и модели глубокого обучения), как правило, поверхностны, потому что они ограничены статистическим выявлением некоторых закономерностей из огромных данных, следующих за независимыми идентичными распределениями (а именно, i.i.d). Это ограничение часто влияет на эффективность подходов ИИ, когда они реализуются в инженерном секторе, потому что: (1) они очень требовательны к данным, но сбор таких больших данных нецелесообразен в практических проектах; и (2) необработанные данные в значительной степени определяют производительность модели; другими словами, трудно перенести предварительно обученные модели для различных инженерных задач, которые зависят от данных, следующих за разным распределением (Wu, Wang, et al., 2021). Таким образом, в будущем интеллектуальном инженерном мозге модели ИИ должны фиксировать и понимать лежащие в основе механизмы случайного воздействия между объектами и событиями проекта, которые обладают сильными способностями к рассуждениям и могут адаптироваться к различным требованиям решения проблем и принятия решений с небольшим количеством действий. данные (Schölkopf et al., 2021). Например, когда модель обучена прогнозировать риски для безопасности с помощью правил и норм в одной стране, она может автоматически адаптироваться к проектам в другой стране, где действуют аналогичные, но другие правила безопасности.

Тем не менее, это связано с двумя проблемами. Во-первых, должны быть разработаны графы знаний, включающие как абстрактную, так и конкретную части. Абстрактные части (также называемые онтологиями) будут моделировать общие и абстрактные концепции (т. е. классы) и отношения между классами (например, класс «Подъемное оборудование»), тогда как конкретные части будут моделировать физические объекты в конкретных проектах (например, кран — это «Подъемное оборудование»), сопоставление между сущностями и классами и отношения между сущностями. Графы знаний должны разрабатываться автоматически, что требует набора методов ИИ, например, понимания текста, построения и слияния онтологий, а также глубокого обучения на графах (Zhang et al., 2018). Во-вторых, на основе графов знаний о проекте семантические правила рассуждений и модели глубокого обучения, основанные на логике, могут быть объединены вместе для поиска информации о проекте, вывода неявных знаний, скрытых в графах, и рекомендации решений и решений, имитирующих расходящиеся-сходящиеся механизмы мышления человеческие инженеры. В частности, эвристические правила сначала используются для вывода информации путем интерпретации узлов и ребер на графах, в то время как модели глубокого обучения могут предсказывать недостающие элементы в телах правил (Zhang et al., 2020). В настоящее время правила рассуждений все еще приходится создавать вручную; однако с развитием передовых моделей аварийного обучения сложные механизмы случайного воздействия и рассуждений для правил могут быть установлены и закодированы в моделях глубокого обучения следующего поколения (Schölkopf et al., 2021). Кроме того, методы Metaverse могут визуализировать описанный выше процесс рассуждения, чтобы инженеры-люди могли легко взаимодействовать с любым шагом рассуждения и источником информации, добавляя при этом свои собственные знания предметной области в качестве обратной связи, чтобы постоянно повышать способность рассуждений моделей.

## Взаимодействие нескольких машин и человек-машина

В ближайшем будущем можно ожидать интеллектуального сотрудничества, основанного на технологических достижениях, особенно в формах совместной работы нескольких устройств и совместной работы человека и машины.

## Совместная работа на нескольких машинах

Сотрудничество между несколькими устройствами, машинами и технологиями становится все более популярным по мере развития систем IoT, а ряд связанных технологий становится все более совершенным. Попытки научных кругов включают совместную работу AR/VR в виртуальных средах (Marks et al., 2020), подключенные мобильные телефоны (Airtest), подключенные автомобили (Lu et al., 2014) и другие. Одно из наиболее многообещающих внедрений в секторе АЕС — упростить автоматизированный и эффективный процесс строительства, при котором локальное оборудование взаимодействует друг с другом, не вызывая столкновений и не создавая опасности для рабочих. Дополнительные машины, как и камеры наблюдения, также будут подключены для интеллектуального мониторинга ближайших строительных ресурсов, таких как тяжелое оборудование на работе или строительные материалы, поступающие на склад на месте. Другие сценарии использования включают этапы эксплуатации и технического обслуживания (O&M), когда несколько машин для неразрушающего контроля подключены и автоматизированы для эффективного контроля.

## Сотрудничество человека и машины

Вместо того, чтобы рассматривать машины как инструмент, люди сотрудничают с искусственным интеллектом и другими машинами в модели взаимодействия человека и машины для достижения общих целей. В гонке с машинами (Kelly, 2017) такое сотрудничество позволяет заполнить пробелы в интеллектуальных и физических возможностях друг друга, хотя эмпирические исследования показали, что менеджеры-люди предпочитают такое партнерство, когда у машин примерно 30% ресурсов (Haesevoets et al., 2021). В промышленных приложениях обычно используются коллаборативные роботы, специально предназначенные для прямого взаимодействия с людьми на общем рабочем месте. В секторе АЕС сотрудничество человека и машины было бы особенно полезно для творческих проектов, например, архитектурного проектирования (за исключением повторяющейся работы по инженерным чертежам), а также для принятия управленческих решений как на строительных площадках, так и на этапе эксплуатации и обслуживания гражданских активов. В этих процедурах архитекторы, инженеры и управляющие активами смогут работать в сотрудничестве с машинами, которые обучены массивным историческим данным и руководствам. Управление проектами на строительных площадках также может воспользоваться преимуществом такого взаимодействия человека и машины. Например, менеджеры на местах могут быть проинформированы обо всех типах информации в режиме реального времени, включая прогресс, риски и проблемы. При дальнейшей помощи интеллектуальных агентов можно ожидать более эффективного и автоматизированного управления.

## Инженерный мозг: метавселенная для инженеров будущего

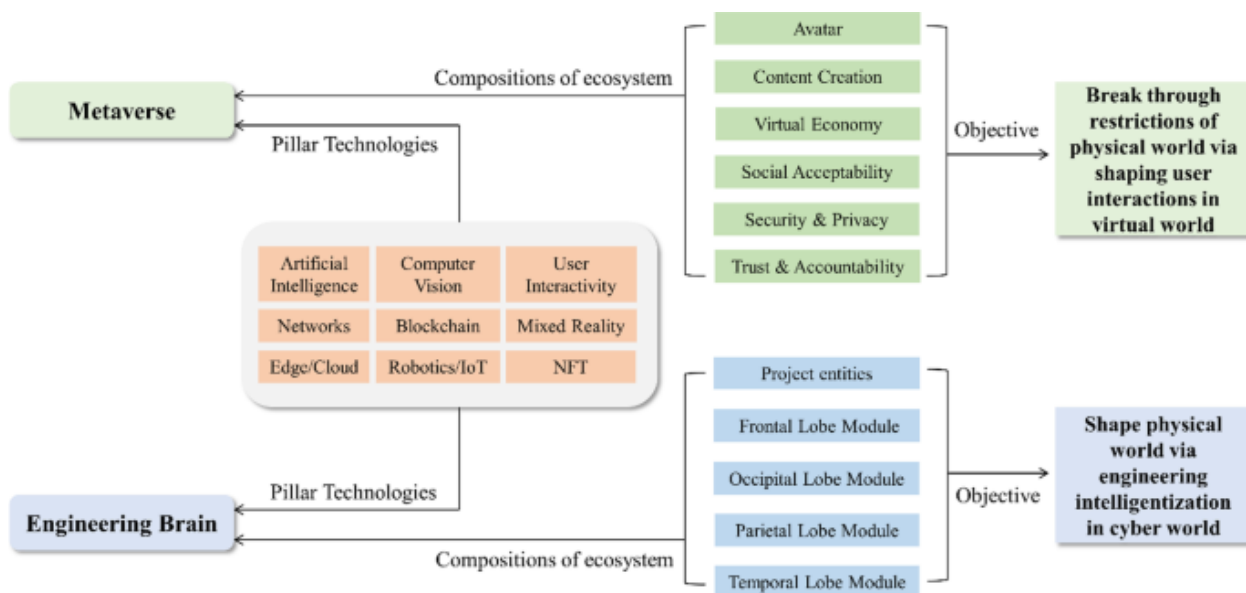
В этом разделе проводится сравнительный анализ Метавселенной и Инженерного мозга с учетом их опорных технологий, состава экосистем, основных целей и основных элементов.

## Основные технологии, экосистемы и цели Метавселенной и Инженерного мозга

Сравнение Метавселенной и Инженерного мозга представлено на рис. 9 с точки зрения основных технологий, состава экосистем и целей. Разработка как Metaverse, так и Engineering Brain в

значительной степени зависит от аналогичных современных технологий, включая искусственный интеллект, будущие мобильные сети, Edge/Cloud, Computer Vision, Blockchain, Robotics/IoT, взаимодействие с пользователем, смешанную реальность и т. д. (Lee et al., 2021). Однако составы и цели этих двух платформ различаются.

Рис. 9



#### Основные технологии, составы экосистем и цели как Metaverse, так и Engineering Брайана

Metaverse намеревается предоставить пользователям бесшовный, бесконечный и окончательный виртуальный опыт, создав постоянно воспринимаемый виртуальный мир, в котором будут сочетаться цифровой и физический миры, усиленные слиянием интернет-технологий и расширенной реальности (Lee et al., 2021). Пользователи Метавселенной владеют своими виртуальными заместителями, известными как Аватары, которые уподобляют свое физическое «я», чтобы испытать свою виртуальную жизнь (Davis et al., 2009; Lee et al., 2021). Согласно Ли и соавт. (2021), экосистема Метавселенной состоит из шести основных столпов: аватар, создание контента, виртуальная экономика, социальная приемлемость, безопасность и конфиденциальность, а также доверие и подотчетность. В Metaverse аватары отражают личность пользователей, в то время как остальные основные элементы будут поддерживать, защищать и ограничивать виртуальные действия и поведение пользователей. Таким образом, цель Метавселенной — формировать и оптимизировать взаимодействие пользователей и альтернативный опыт в виртуальном мире, чтобы преодолеть ограничения физического мира.

Инженерный мозг предназначен для интеллектуального управления инженерными проектами и обеспечения точного и всеобъемлющего цифрового управления в режиме реального времени и беспилотного строительства путем создания интеллектуальной системы принятия инженерных решений, подобной человеческому мозгу. Engineering Brain может снабдить инженерные проекты «мозгом» ИИ, чтобы обеспечить сбор информации в режиме реального времени, интеллектуальный анализ и принятие решений, эффективный обмен информацией и автоматическое руководство по построению проекта. Ключевые экологические составы инженерного мозга включают объекты инженерного проекта и четыре основных модуля,



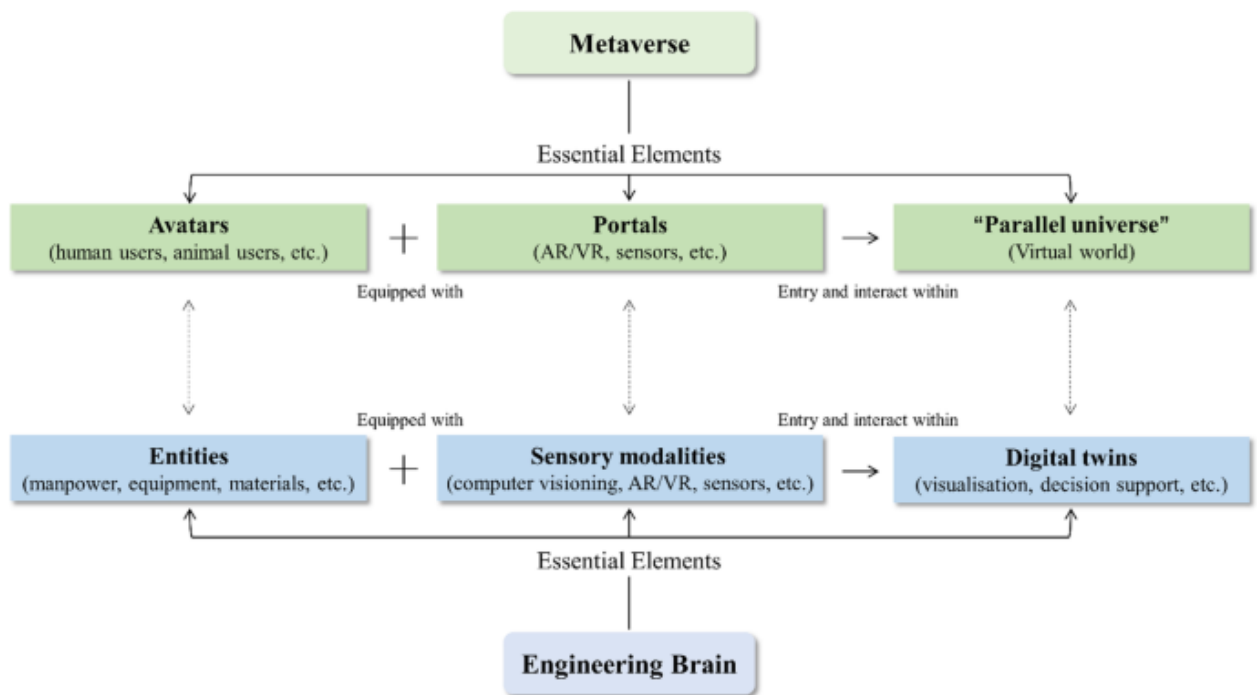
подобных человеческому мозгу (т. е. модуль лобной доли, модуль затылочной доли, модуль теменной доли и модуль височной доли). В частности, объекты проекта относятся к основным ресурсам проекта, таким как рабочая сила, оборудование, объекты, материалы и т. д., в то время как модули, подобные человеческому мозгу, отражают современные междоменные технологии с рабочим механизмом. по аналогии с взаимодействиями между областями человеческого мозга. Эти модули собирают, передают, анализируют и хранят различные типы данных проекта, а затем вырабатывают прогнозы и решения, чтобы дать возможность объектам проекта взаимодействовать в кибермире систем Engineering Brain и, наконец, управлять сущностями, чтобы выполнять свои задачи в физическом мире. Таким образом, инженерный мозг работает с инженерными проектами, чтобы предоставлять интеллектуальные инженерные решения на протяжении всего жизненного цикла проектов и соответствующим образом формировать физический мир.

Несмотря на различия между Метавселенной и Инженерным мозгом с точки зрения экосистем и целей, оба они могут изменять или формировать взаимодействия или действия в физическом мире посредством конструкций в виртуальном мире.

#### Основные элементы метавселенной и инженерного мозга

На рис. 10 показаны основные элементы Метавселенной и Инженерного мозга, а также их соответствующие взаимосвязи. В соответствии с популярными в настоящее время концепциями в игровой и социальной областях, с точки зрения способов доступа и взаимодействия, основные элементы Метавселенной могут быть весьма абстрагированы как Аватары, Порталы и «Параллельная вселенная». В частности, аватары определяются как созданные пользователями цифровые представления, контролируемые пользователями, которые участвуют в Метавселенной и взаимодействуют с другими в виртуальных личностях (Bailenson et al., 2005). Помимо людей, животные (например, домашние животные человека) также могут постепенно становиться пользователями Метавселенной, взаимодействуя внутри нее (Davis et al., 2009). В Metaverse все виртуальные творения основаны на опыте пользователей, чтобы аватары представляли физических пользователей, чтобы они чувствовали и действовали так, как если бы они были в реальном мире или даже за его пределами. Порталы относятся к аппаратным устройствам или интерфейсам, с помощью которых пользователи могут входить в виртуальный мир Метавселенной и реализовывать свои виртуальные чувства для взаимодействия, такие как VR, AR, датчики, мозговые чипы и т. д. Таким образом, порталы являются незаменимыми мостами для связи физических пользователей и виртуальный мир в Метавселенной. «Параллельная вселенная» в этом контексте подразумевает виртуальный мир Метавселенной, созданный с использованием передовых веб- и интернет-технологий (Lee et al., 2021), предназначенный для взаимодействия пользователей в качестве Аватаров. Это также самая популярная область Метавселенной в настоящее время, привлекающая огромное внимание, воображение и капиталы для развития. Ясно, что эта логика разбора Метавселенной основана на переплетении виртуальности и реальности, включая не только широко упоминаемый и воображаемый «виртуальный мир», но и физические объекты и интерфейсы Метавселенной.

Рис. 10



### Основные элементы метавселенной и инженерного мозга

Аналогичным образом, инженерный мозг также считается состоящим из трех основных элементов: сущностей, сенсорных модальностей и цифровых двойников. Сущности здесь относятся к основным ресурсам инженерного проекта, таким как рабочая сила, оборудование, объекты, материалы и т. д., которые могут быть оцифрованы или символизированы в системе инженерного мозга и могут взаимодействовать в соответствии с инструкциями. И тогда задачи можно выполнять в физическом мире. Сущности являются основной физической поддержкой, включая участников на протяжении всего жизненного цикла инженерных проектов. Сенсорные модальности — это способы получения сенсорных данных, таких как визуальная, тактильная и слуховая информация, через устройства или интерфейсы. Они относятся к модулям восприятия инженерного мозга, включая модуль затылочной доли и модуль теменной доли, и играют роль оснащения сущностей, чтобы войти в кибермир инженерного мозга и заставить их взаимодействовать. Такие технологии, как смешанная реальность, компьютерное зрение или различные типы датчиков (Wang, 2008), могут использоваться для поддержки сенсорных модальностей. Цифровые двойники (Hou et al., 2021; Lee et al., 2021; Mohammadi & Taylor, 2017) подразумевают кибермир инженерного мозга. В этом контексте цифровые двойники не только включают в себя все свойства дублированных физических копий, но также охватывают модули, отвечающие за передачу данных, анализ данных и принятие решений, включая модуль лобной доли и модуль височной доли. Цифровые двойники позволяют организациям виртуально и интеллектуально выполнять все операции, необходимые для инженерных проектов (например, визуализацию, интеллектуальное проектирование, беспилотное строительство и т. д.) (Ma et al., 2021; Wang, 2007a, 2007b), чтобы направлять их. соответствующим образом формируя физический мир.

### Инженерный мозг: метавселенная для инженеров будущего

На основе приведенного выше анализа можно установить соответствующие отношения между основными элементами Метавселенной и Инженерного мозга. Элементы Сущностей, Сенсорных модальностей и Цифровых двойников в Инженерном мозгу можно понимать по аналогии с

элементами Аватаров, Порталов и «Параллельной вселенной» в Метавселенной, соответственно, как показано на рис. 10. И Инженерный мозг, и Метавселенная оснащают физические сущности. или пользователи с интерфейсами, чтобы они могли подключаться к виртуальному миру и в конечном итоге влиять на свое поведение и производительность в физическом мире, формируя свое участие и взаимодействие в виртуальной среде. Виртуальные миры Engineering Brain and d Метавселенная — это не только простые дубликаты или отображения реальностей, но также и возможности, позволяющие исправить и превзойти дефекты физического мира. Например, им будут предложены независимые экономические системы, основанные на блокчейне, высокоинтеллектуальные механизмы и операции, основанные на вычислениях, эффективный и бесшовный переход между виртуальным и реальным, высокая степень автономии и т. д. Поэтому, если Метавселенная спроектирована и разработана для людей (и, возможно, их питомцев) в игровой или социальной индустрии, то Engineering Brain можно рассматривать как Метавселенную для будущего проектирования.

## Вывод

Основываясь на актуальной теме Metaverse и текущих достижениях в цифровизации и автоматизации строительной отрасли, в этом исследовании предлагается теоретическая система Engineering Brain для управления строительными проектами. Обсуждаются сходства и различия между системой Инженерного мозга и Метавселенной, а также исследуется преобразование Инженерного мозга в Метавселенную с акцентом на роли Аватаров в системе Инженерного мозга. Кроме того, даны перспективы строительной отрасли будущего, подпитываемой Метавселенной и соответствующими технологиями, которые потенциально могут способствовать дальнейшему развитию смежных областей.

## References

- Abuthakeer, S. S., Kumar, S. R., & Arvind, R. M. (2017). Bionics as an Inspiration for Machine Tool Structure-A Review. *Manufacturing Technology Today*, 16(5), 10–15.

### [Google Scholar](#)

- Airtest. Airtest Project Docs: Multi-machine collaboration script. Accessed Nov 21, 2021. [https://airtest.doc.io.netease.com/en/IDEdocs/run\\_script/2\\_multi\\_cooperation/](https://airtest.doc.io.netease.com/en/IDEdocs/run_script/2_multi_cooperation/)
- Alcalá, J., Ureña, J., Hernández, Á., & Gualda, D. (2017). Event-based energy disaggregation algorithm for activity monitoring from a single-point sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 66(10), 2615–2626. <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2700987>

### [Article Google Scholar](#)

- Alizadehsalehi, S., Hadavi, A., & Huang, J. C. (2020). From BIM to extended reality in AEC industry. *Automation in Construction*, 116, 103254.

---

### [Article Google Scholar](#)

- Andrews, C., Southworth, M. K., Silva, J. N., & Silva, J. R. (2019). Extended reality in medical practice. *Current Treatment Options in Cardiovascular Medicine*, 21(4), 1–12.

---

### [Article Google Scholar](#)

- Arikan, E. (2009). Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 55(7), 3051–3073.

---

### [MathSciNet Article Google Scholar](#)

- Ayhan, B. U., & Tokdemir, O. B. (2019). Safety assessment in megaprojects using artificial intelligence. *Safety Science*, 118, 273–287. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.05.027>

---

### [Article Google Scholar](#)

- Bailenson, J., Swinth, K., Hoyt, C., Persky, S., Dimov, A., & Blascovich, J. (2005). The independent and interactive effects of embodied-agent appearance and behavior on self-report, cognitive, and behavioral markers of copresence in immersive virtual environments. *Presence*, 14(4), 379–393.

---

### [Article Google Scholar](#)

- Benford, S., Brown, C., Reynard, G., & Greenhalgh, C. (1996). “Shared spaces: transportation, artificiality, and spatiality.” In Vol. of Proceedings of the 1996 ACM conference on Computer supported cooperative work, 77–86. <https://doi.org/10.1145/240080.240196>
- Bhargava, A., & Bansal, A. (2021). Novel coronavirus (COVID-19) diagnosis using computer vision and artificial intelligence techniques: a review. *Multimedia Tools and Applications*, 1–16.
- Bock, T. (2015). The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics. *Automation in Construction*, 59, 113–121.

---

### [Article Google Scholar](#)

---

- Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114, 103179.

---

### [Article Google Scholar](#)

- Bradley, A., Li, H., Lark, R., & Dunn, S. (2016). BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective. *Automation in Construction*, 71, 139–152. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.019>

---

### [Article Google Scholar](#)

- Brosnan, T., & Sun, D.-W. (2004). Improving quality inspection of food products by computer vision—a review. *Journal of Food Engineering*, 61(1), 3–16.

---

### [Article Google Scholar](#)

- Buch, N., Velastin, S. A., & Orwell, J. (2011). A review of computer vision techniques for the analysis of urban traffic. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(3), 920–939.

---

### [Article Google Scholar](#)

- Australian Government's Cooperative Research Centre program. 2020. Building 4.0 CRC. Accessed Nov 15, 2021. <https://building4pointzero.org/>
- Chermahini, S. A., & Hommel, B. (2012). Creative mood swings: divergent and convergent thinking affect mood in opposite ways. *Psychological Research Psychologische Forschung*, 76(5), 634–640. <https://doi.org/10.1007/s00426-011-0358-z>

---

### [Article Google Scholar](#)

- Chevet, S. (2018). Blockchain technology and non-fungible tokens: Reshaping value chains in creative industries. *Available at SSRN* 3212662.
- CryptoCats. 2021. Accessed Nov 14, 2021. <https://cryptocats.thetwentysix.io/>
- Davis, A., Murphy, J., Owens, D., Khazanchi, D., & Zigurs, I. (2009). Avatars, people, and virtual worlds: Foundations for research in metaverses. *Journal of the Association for Information Systems*, 10(2), 90.

### [Article Google Scholar](#)

- Denny, M. J., & Spirling, A. (2018). Text preprocessing for unsupervised learning: Why it matters, when it misleads, and what to do about it. *Political Analysis*, 26(2), 168–189. <https://doi.org/10.1017/pan.2017.44>

### [Article Google Scholar](#)

- Ding, L., Fang, W., Luo, H., Love, P. E., Zhong, B., & Ouyang, X. (2018). A deep hybrid learning model to detect unsafe behavior: Integrating convolution neural networks and long short-term memory. *Automation in Construction*, 86, 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.11.002>

### [Article Google Scholar](#)

- Dowling, M. (2021). Is non-fungible token pricing driven by cryptocurrencies? *Finance Research Letters*. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2021.102097>

### [Article Google Scholar](#)

- Elghaish, F., Matarneh, S., Talebi, S., Kagioglou, M., Hosseini, M. R., & Abrishami, S. (2020). Toward digitalization in the construction industry with immersive and drones technologies: a critical literature review. *Smart and Sustainable Built Environment.*, 10, 345.

### [Article Google Scholar](#)

- Eliasmith, C., & Anderson, C. H. (2003). *Neural engineering: Computation, representation, and dynamics in neurobiological systems*. New York: MIT press.

### [Google Scholar](#)

- Fast-Berglund, Å., Gong, L., & Li, D. (2018). Testing and validating Extended Reality (xR) technologies in manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 25, 31–38.

### [Article Google Scholar](#)

- Feng, D., & Feng, M. Q. (2018). Computer vision for SHM of civil infrastructure: From dynamic response measurement to damage



detection – A review. *Engineering Structures*, 156, 105–117. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.018>

---

### [Article Google Scholar](#)

- Gallager, R. (1962). Low-density parity-check codes. *IRE Transactions on Information Theory*, 8(1), 21–28.

---

### [MathSciNet Article Google Scholar](#)

- Epic Games. Fortnite. Accessed Nov 10, 2021. <https://www.epicgames.com/fortnite/en-US/home>
- Gamil, Y., Abdullah, M. A., Abd Rahman, I., & Asad, M. M. (2020). Internet of things in construction industry revolution 4.0: Recent trends and challenges in the Malaysian context. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 18(5), 1091–1102. <https://doi.org/10.1108/JEDT-06-2019-0164>

---

### [Article Google Scholar](#)

- Ghosh, A., Edwards, D. J., & Hosseini, M. R. (2020). Patterns and trends in Internet of Things (IoT) research: future applications in the construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 28(2), 457–481. <https://doi.org/10.1108/ECAM-04-2020-0271>

---

### [Article Google Scholar](#)

- Goldschmidt, G. (2016). Linkographic evidence for concurrent divergent and convergent thinking in creative design. *Creativity Research Journal*, 28(2), 115–122. <https://doi.org/10.1080/10400419.2016.1162497>

---

### [Article Google Scholar](#)

- Haesevoets, T., De Cremer, D., Dierckx, K., & Van Hiel, A. (2021). Human-machine collaboration in managerial decision making. *Computers in Human Behavior*, 119, 106730. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2021.106730>

---

### [Article Google Scholar](#)

- Han, S., Lee, S., & Peña-Mora, F. (2013). Vision-based detection of unsafe actions of a construction worker: Case study of ladder

climbing. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(6), 635–644. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000279](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000279)

### [Article Google Scholar](#)

- Hautala, K., Järvenpää, M. E., & Pulkkinen, P. (2017). Digitalization transforms the construction sector throughout asset's life-cycle from design to operation and maintenance. *Stahlbau*, 86(4), 340–345.

### [Article Google Scholar](#)

- Hou, L., Wu, S., Zhang, G., Tan, Y., & Wang, X. (2021). Literature review of digital twins applications in construction workforce safety. *Applied Science*, 11, 339. <https://doi.org/10.3390/app11010339>.

### [Article Google Scholar](#)

- <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/>
- İlal, S. M., & Günaydın, H. M. (2017). Computer representation of building codes for automated compliance checking. *Automation in Construction*, 82, 43–58. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.06.018>

### [Article Google Scholar](#)

- Jeong, S., Hou, R., Lynch, J. P., Sohn, H., & Law, K. H. (2019). A scalable cloud-based cyberinfrastructure platform for bridge monitoring. *Structure and Infrastructure Engineering*, 15(1), 82–102. <https://doi.org/10.1080/15732479.2018.1500617>

### [Article Google Scholar](#)

- Kelly, K. (2017). *The inevitable: Understanding the 12 technological forces that will shape our future*. Penguin.

### [Google Scholar](#)

- Khan, A., Sepasgozar, S., Liu, T., & Yu, R. (2021). Integration of BIM and immersive technologies for AEC: A scientometric-SWOT analysis and critical content review. *Buildings*, 11(3), 126.

### [Article Google Scholar](#)

- Kim, J.-M., & Jung, H. (2019). Predicting bid prices by using machine learning methods. *Applied Economics*, 51(19), 2011–2018. <https://doi.org/10.1080/00036846.2018.1537477>

### **[Article Google Scholar](#)**

- Kwok, A. O., & Koh, S. G. (2021). COVID-19 and extended reality (XR). *Current Issues in Tourism*, 24(14), 1935–1940.

### **[Article Google Scholar](#)**

- Linden Lab. Second Life. Accessed Nov 10, 2021. <https://www.secondlife.com/>
- Lanxon, N., & Bloomberg. (2021). Welcome to the Metaverse: What it is, who's behind it, and why it matters. *Fortune*. Accessed Nov 3, 2021. <https://fortune.com/2021/09/29/welcome-metaverse-what-it-is-who-behind-why-matters-matrix-zuckerberg/>
- Lee, P., Braud, T., Zhou, P., Wang, L., Xu, D., Lin, Z., Kumar, A., Bermejo, C., & Hui, P. (2021). All One Needs to Know about Metaverse: A Complete Survey on Technological Singularity. *Virtual Ecosystem and Research Agenda*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11200.05124/7>

### **[Article Google Scholar](#)**

- Legg, S., & Hutter, M. (2007). A collection of definitions of intelligence. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 157, 17.

### **[Google Scholar](#)**

- Li, X., Yi, W., Chi, H.-L., Wang, X., & Chan, A. P. (2018). A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety. *Automation in Construction*, 86, 150–162. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.11.003>

### **[Article Google Scholar](#)**

- Lu, N., Cheng, N., Zhang, N., Shen, X., & Mark, J. W. (2014). Connected vehicles: Solutions and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(4), 289–299.

### **[Article Google Scholar](#)**

- Ma, W., Wang, X., Wang, J., Xiang, X., & Sun, J. (2021). Generative design in building information modelling (BIM): approaches and requirements. *Sensors*, 21(16), 5439.

### **[Article Google Scholar](#)**

- Marks, S., & White, D. (2020). Multi-Device Collaboration in Virtual. *Environments*. <https://doi.org/10.1145/3385378.3385381>

---

### **[Article Google Scholar](#)**

- Microsoft. 2021. Microsoft Inspire 2021. <https://myinspire.microsoft.com/home>
- Mohammadi, N., & Taylor, J. E. (2017). Smart city digital twins. 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI), 1–5. <https://doi.org/10.1109/SSCI.2017.8285439>.
- Poole, D., Mackworth, A., & Goebel, R. (1998). Computational Intelligence.
- Pramanik, A., Pal, S. K., Maiti, J., & Mitra, P. (2021). Granulated RCNN and multi-class deep sort for multi-object detection and tracking. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*.
- Radoff, J. (2021). The Metaverse Value-Chain. *Medium*. Accessed Nov 21, 2021. <https://medium.com/building-the-metaverse/the-metaverse-value-chain-afcf9e09e3a7>
- Ren, S., He, K., Girshick, R., & Sun, J. (2015). Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks. In *Advances in neural information processing systems*. 91–99.
- Riaz, Z., Parn, E. A., Edwards, D. J., Arslan, M., Shen, C., & Pena-Mora, F. (2017). BIM and sensor-based data management system for construction safety monitoring. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 15(6), 738–753. <https://doi.org/10.1108/JEDT-03-2017-0017>

---

### **[Article Google Scholar](#)**

- Schölkopf, B., Locatello, F., Bauer, S., Ke, N. R., Kalchbrenner, N., Goyal, A., & Bengio, Y. (2021). Toward causal representation learning. *Proceedings of the IEEE*, 109(5), 612–634.

---

### **[Article Google Scholar](#)**

- Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637–646.

---

### **[Article Google Scholar](#)**

- Silva, J. N., Southworth, M., Raptis, C., & Silva, J. (2018). Emerging applications of virtual reality in cardiovascular medicine. *JACC: Basic to Translational Science*, 3(3), 420–430.

---

### **[Google Scholar](#)**

---

- Song, H., Nguyen, A.-D., Gong, M., & Lee, S. (2016). A review of computer vision methods for purpose on computer-aided diagnosis. *Journal of International Society for Simulation Surgery*, 3(1), 1–8.

---

### [Article Google Scholar](#)

- Squire, L., Berg, D., Bloom, F. E., Du Lac, S., Ghosh, A., & Spitzer, N. C. (2012). *Fundamental neuroscience*. New York: Academic press.

---

### [Google Scholar](#)

- Stephenson, N. (1992). *Snow Crash*. New York: Bantam Books.

---

### [Google Scholar](#)

- Tian, H., Wang, T., Liu, Y., Qiao, X., & Li, Y. (2020). Computer vision technology in agricultural automation—A review. *Information Processing in Agriculture*, 7(1), 1–19.

---

### [Article Google Scholar](#)

- 3GPP 2018. TR 21.915, Release description, Release 15.
- Wang, X. (2007a). Implementation and Experimentation of a Mixed Reality Collaborative Design Space. In *International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design*. 111–122.
- Wang, X. (2007b). Mutually augmented virtual environments for architectural design and collaboration. *Computer-Aided Architectural Design Futures (CAADFutures)*, 2007, 17–29.

---

### [Article Google Scholar](#)

- Wang, X. (2008). Implementation and Experimentation of a Mixed Reality Collaborative Design Space. In W. Shen, J. Yong, Y. Yang, J. P. A. Barthès, & J. Luo (Eds.), *Computer Supported Cooperative Work in Design IV. CSCWD 2007. Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 5236). Berlin, Heidelberg: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-92719-8\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-540-92719-8_11).

---

### [Chapter Google Scholar](#)

- Wang, C.-Y., Yeh, I.-H., & Liao, H.-Y. M. (2021a). You Only Learn One Representation: Unified Network for Multiple Tasks. arXiv preprint [arXiv:2105.04206](https://arxiv.org/abs/2105.04206).
-

- Wang, Q., Li, R., Wang, Q., & Chen, S. (2021b). Non-fungible token (NFT): Overview, evaluation, opportunities and challenges. arXiv preprint [arXiv:2105.07447](https://arxiv.org/abs/2105.07447).
- Wang, X., & Chong, H.-Y. (2015). Setting new trends of integrated Building Information Modelling (BIM) for construction industry. *Construction Innovation*, 15(1), 2–6. <https://doi.org/10.1108/CI-10-2014-0049>

---

### [Article Google Scholar](#)

- Wu, C., Wang, X., Wu, P., Wang, J., Jiang, R., Chen, M., & Swapan, M. (2021). Hybrid deep learning model for automating constraint modelling in advanced working packaging. *Automation in Construction*, 127, 103733.

---

### [Article Google Scholar](#)

- Wu, C., Wu, P., Wang, J., Jiang, R., Chen, M., & Wang, X. (2020). Critical review of data-driven decision-making in bridge operation and maintenance. *Structure and Infrastructure Engineering*. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1833946>

---

### [Article Google Scholar](#)

- Wu, C., Wu, P., Wang, J., Jiang, R., Chen, M., & Wang, X. (2021b). Developing a hybrid approach to extract constraints related information for constraint management. *Automation in Construction*, 124, 103563. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021b.103563>

---

### [Article Google Scholar](#)

- Wu, C., Wu, P., Wang, J., Jiang, R., Chen, M., & Wang, X. (2021c). Ontological knowledge base for concrete bridge rehabilitation project management. *Automation in Construction*, 121, 103428. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103428>

---

### [Article Google Scholar](#)

- Wu, P., Wang, J., & Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, 68(68), 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.005>

---

### [Article Google Scholar](#)

---



- Xu, S., Wang, J., Shou, W., Ngo, T., Sadick, A. M., & Wang, X. (2020). Computer vision techniques in construction: A critical review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09504-3>

---

**[Article Google Scholar](#)**

- Yu, W., Li, B., Jia, H., Zhang, M., & Wang, D. (2015). Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design. *Energy and Buildings*, 88, 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.063>

---

**[Article Google Scholar](#)**

- Zang, H., Zhang, S., & Hapeshi, K. (2010). A review of nature-inspired algorithms. *Journal of Bionic Engineering*, 7(4), S232–S237.

---

**[Article Google Scholar](#)**

- Zhang, Y., Chen, X., Yang, Y., Ramamurthy, A., Li, B., Qi, Y., & Song, L. (2020). Efficient probabilistic logic reasoning with graph neural networks. arXiv preprint [arXiv:2001.11850](https://arxiv.org/abs/2001.11850).
- Zhang, Z., Cui, P., & Zhu, W. (2018). Deep learning on graphs: a Survey. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 14(8), 1–24. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2020.2981333>

---

**[Article Google Scholar](#)**

- Zhou, G.-D., Xie, M.-X., Yi, T.-H., & Li, H.-N. (2019). Optimal wireless sensor network configuration for structural monitoring using automatic-learning firefly algorithm. *Advances in Structural Engineering*, 22(4), 907–918. <https://doi.org/10.1177/1369433218797074>

---

**[Article Google Scholar](#)**

- Zhu, J., Wang, X., Wang, P., Wu, Z., & Kim, M. J. (2019). Integration of BIM and GIS: Geometry from IFC to shapefile using open-source technology. *Automation in Construction*, 102, 105–119. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.014>

---

**[Article Google Scholar](#)**

---

- Zuckerberg, M. (2021). *Connect 2021*. <https://www.facebook.com/facebookrealitylabs/videos/561535698440683/>
- Zweifach, S. M., & Triola, M. M. (2019). Extended reality in medical education: Driving adoption through provider-centered design. *Digital Biomarkers*, 3(1), 14–21.

---

### [Article Google Scholar](#)

---

AI in Civil Engineering (AICE) — это международный журнал, в котором публикуются оригинальные исследовательские работы, обзоры, комментарии и точки зрения на применение ИИ в гражданском строительстве. В сферу охвата журнала входят базовые исследования и инженерные приложения передовых технологий искусственного интеллекта, таких как машинное обучение, глубокое обучение, компьютерное зрение, обработка естественного языка, улучшенное отображение и большие данные, блокчейн, облачные вычисления и Интернет вещей во всех областях. различные области гражданского строительства, включая проектирование конструкций, геотехническое проектирование, проектирование мостов, инфраструктуру, строительство, смягчение последствий стихийных бедствий и т. д. Журнал AICE посвящен расширению границ открытия знаний с помощью ИИ и технологических инноваций в гражданском строительстве. Это публикация с открытым доступом, и плата за обработку статьи (APC) взимается со статей, которые принимаются к публикации редакторами. APC для этого журнала покрывается Университетом Тундзи.

- Политика открытого доступа обеспечивает максимальную видимость статей, опубликованных в журнале, поскольку они доступны для широкой мировой аудитории.
- Обеспечивает междисциплинарный форум для передовых исследований по теме научных и технологических инноваций в гражданском строительстве с использованием ИИ.
- Авторам не нужно платить APC, так как оплата за публикации покрывается