arXiv:2304.07309v1 [cs.DB] 14 Apr 2023

利用代币化数据资产激励建筑数据的可用性与可访问性

Sarad Venugopalan 和 Heiko Aydt新加坡-
*ETH*中心sarad.venugopalan@sec.ethz.ch,
heiko.aydt@sec.ethz.ch

摘要—**智慧城市由数据驱动，并从各种来源收集数据。尽管建筑数据具有价值，但这类数据却未得到充分呈现，仍然难以获取。我们的目标是将建筑数据转化为资产，激励利益相关者更便捷地提供建筑数据。我们利用区块链上的代币化建筑数据资产来提高数据的可访问性。具体而言，我们通过代币（可替代代币和非同质化代币）连接建筑数据所有者与建筑信息的消费者，从而协调建成环境生态系统中的各项活动。此外，我们还介绍了旨在维持相关各方及个人经济激励的系统架构。**

索引词—**建筑数据资产、建筑施工、非同质化代币、区块链应用、系统架构。**

I. 引言

在建筑施工中，大量能源消耗于从地球开采材料、加工材料并将其运送至目的地。能源消耗不仅限于施工现场对材料所耗费的能源，还包括此前所有环节消耗的能源。隐含能 [1] 被视为储存在最终产品中的“隐性能量”。拆除建筑中的可重复使用和可回收材料若未用于其预期用途，就会加剧枯竭资源的压力（这是大量材料开采 [2]造成的结果），而这些资源需要重新开采。稀缺资源会变得更加昂贵，其加工所需能源可能增加（尤其是在能源成本上涨期间），并产生累积性环境影响，进而增加对个人和社会健康与生活造成的成本。鉴于城市建筑施工的规模，以及需要开采、加工并运送至目的地的材料数量，材料稀缺、能源消耗和环境影响使建筑材料对可持续性 [3]产生了巨大影响。目前，寻找可重复使用和可回收材料，以及获取其质量、数量、拆解信息、位置和可用性数据的途径都不完善。尽管一些国家在重复使用和回收方面有所进步，但相当一部分材料最终仍被送往垃圾填埋场 [4], [5]。根据美国环境保护署 [6], 的说法：“材料与废弃物交易平台是买卖可重复使用和可回收商品的市场。有些平台是实体仓库，通过印刷目录宣传可供交易的商品；另一些则只是连接买方与卖方的网站。有些由州和地方政府协调管理；另一些则完全由营利性私营企业运营。”这一流程仅实现了半自动化，且各自为政，因而难以在各个领域寻找资源并优化资源分配。

其次，建筑数据无法获取或获取不完整，因而难以创建建筑模型并开展研究所需的数据分析，这仍然是一个问题。城市尺度的建筑模型用于了解过去和当前的需求模式、测试未来情景，并协助决策者为现有城市和未来城市作出最佳选择。建筑信息是创建建筑模型必不可少的输入，但其中存在数据缺失，且很少具备所需的粒度 [7]，[8]。目前，收集所需数据的一些方法包括从现有数据集中获取数据。这些数据可能是来自政府来源的开放数据，例如市政部门、政策制定者和公用事业机构提供的数据。还有一些是基于现有数据间接生成的数据，例如使用机器学习 [9] 填补缺失部分。人们日益认识到，公共政策需要基于证据进行测试和评估 [10]。Kohler和Hassler [11],指出：“大多数国家都已认识到，需要更可靠的模型来描述建筑存量的构成和动态变化，但用于建立这些模型的统计数据仍然不足。因此，研究进展没有达到应有的速度。”在我们的研究中，我们通过聚焦源头数据收集并采用激励机制来建立可持续的经济模型，扩展了建筑业的数据收集技术体系（见第七节）。我们构建的建成环境生态系统有望减轻建筑数据收集方面的一些困难（见图1），并提升人们寻找可重复使用和可回收建筑材料的能力，同时为研究人员和分析人员提供达到所需粒度的完整数据。

我们的贡献如下，

i.) 我们提出了用于激励建成环境生态系统中的利益相关者提高数据可用性和可访问性的架构（见第五节）。
ii.) 我们讨论了激励模型的可持续性（第六节A），提供了应用用例（第六节E），并论证了在我们的生态系统中使用区块链的合理性（第六节G）。

本文其余部分安排如下。第二节介绍预备知识。第三节概述解决方案。第四节详细介绍系统模型与设计目标。第五节介绍系统架构。第六节讨论我们架构的影响。第七节介绍相关工作。最后，我们在第八节总结研究发现与贡献。

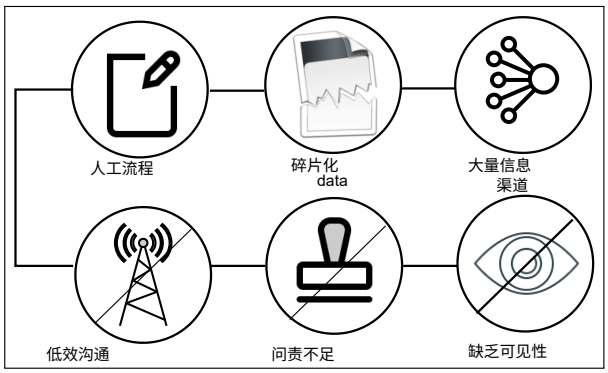

图 1. 建筑数据的收集之所以困难，是因为数据通过多个渠道由众多人提供，缺乏冗余和一致性检查；数据碎片化，且采用人工流程进行记录，同时还存在低效沟通、问责不足和数据可见性欠缺等问题。使用各种互不连通的软件加剧了孤岛式运作的问题，并阻碍了实时数据可用性。

II. 预备知识

本节将介绍数据资产、建筑数据资产和代币的定义及要求。

A. 数据资产

如果资产是指“一种具有经济价值、由个人、公司或国家拥有或控制，并预期能够带来未来收益的资源”，那么数据资产就是个人、公司或国家拥有或控制，并预期能够带来未来收益的一种（数字且无形的）资源。要将数据视为资产，必须满足以下要求。

（R1）数据资产必须无法被随意复制——这使数据成为独特且可识别的对象，也引入了稀缺性。（R2）数据资产的所有者必须能够占有该资产并实施排他性控制（监管机构可能例外）——这使资产能够成为私有财产（受该资产所属司法管辖区法律的约束），从而使其所有者能够积累、持有、委托、出租或出售其财产。（R3）数据资产必须能够接受监管机构的监管（如有需要）——这使该数据对象在现实世界中任何相关司法管辖区的情境下具备合法性。（R4）数据资产必须能够接受审计（例如，为了验证其完整性并检查是否存在任何损害）。（R5）必须能够从数字资产（或其部分）中生成、推导并提取有用信息，供第三方购买或许可并加以使用，从而使其受益并产生收入来源。

B. 建筑数据资产

建筑数据资产（BDA）是数据资产，加上一个特定于领域的应用程序接口（API），用于与之交互并以对相关领域（即建筑数据资产所对应的建筑领域）有意义的方式操控数据。一个领域内可以有多个 API。例如，在建筑领域中，针对不同的使用场景（如电力消耗〔公寓单元的月度用电量〕、建筑施工〔使用的可回收材料 [14]〕等），可以有不同的 API。同一数据资产可通过不同的 API 访问和交互，而每个 API 只与底层数据资产的部分内容交互。

C. 代币

代币是一种标准化的记账单位。代币代表对数据资产某一方面的特定权益，用于协调企业的活动。例如，它可以代表数据资产的所有权份额或使用权。通常，代币代表在区块链上创建的数据资产，以实现其各项属性。资产存储在区块链上时，并不包含与之关联的大部分数据，而只包含指向这些数据的链接。在区块链上发行的代币若对应数据资产的各项属性，则称为代币化资产。根据具体应用，代币可以是可替代的，也可以是非同质化的。

III. 解决方案概述

目前，建筑信息除了在其直接应用范围内发挥作用外，尚未被视为有价值的事物。原因之一是缺乏长期价值主张，和/或缺乏利用建筑数据创造收入的明确途径。要将建筑数据变现，首先必须对其进行系统化生成或收集（例如，在建筑施工阶段）。此外，必须对建筑数据进行维护、整理并定期更新，才能确保其随着时间推移仍然相关且保持最新。所有这些工作都会产生成本，而公司可能认为，除完成眼前任务所需的数据之外，没有必要继续投入。例如，设计、建筑施工和工程公司可能会在建筑施工的不同阶段创建和使用建筑数据（例如设计和构件数据库、拆除/施工细节 [15]）。然而，建筑建成后，他们可能不再需要这些数据。但理想情况下，这些数据应向专门从事建筑运营和维护的企业开放；这些企业也可以维护和完善建筑数据（例如，加入运营数据，如能源消耗）。根据其专业领域，这些企业还可以通过向有兴趣的第三方（例如建筑运营商/业主、维护承包商、租户、研究与分析公司）出售洞见（例如有关维护需求/事件的信息）来将数据变现。还有一些企业可能专门从事城市材料采矿，或向有兴趣的第三方提供必要的洞见（例如哪些地方可以找到哪些材料），从而为建筑材料循环经济 [16]作出贡献。

我们探讨这样一种可能性：产生/收集数据作为副产品、但缺乏必要的基础设施和技能（或对此缺乏兴趣）的公司（例如建筑、设计和工程公司）

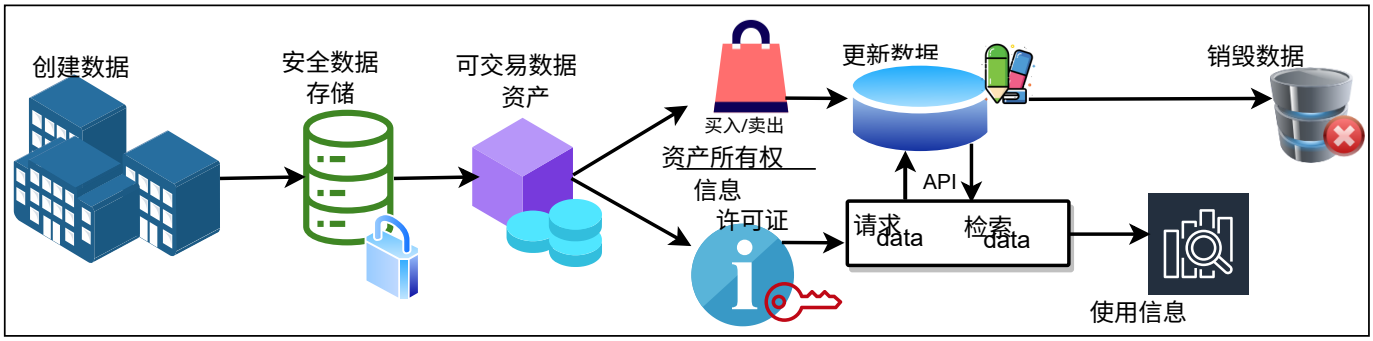

图2. 建筑数据最初生成后会得到安全存储，随后转化为可交易的资产。我们的经济模型包括：i）交易数据所有权；ii）向消费者收取使用信息的许可费。所有者可以出售信息以获取利润，消费者则可以利用这些信息进行分析并获得可操作的洞见。所有者可随着时间推移更新存储的数据，消费者也可重复使用这些数据。通常，建筑拆除时数据会被销毁，但若其具有历史价值，则可能予以保留。

如果这些公司无法将数据货币化，而只能将其用于自身用途，那么它们可以像处置其他任何资产一样，以标准化和结构化的方式，将其建筑数据出售/转让给感兴趣的第三方。这可能促使专门收购（并汇总）某些建筑数据的企业出现，通过挖掘有价值的洞见或出售这些洞见来创造收入。尽管建筑数据本身的技术标准可能已经存在（例如建筑信息模型），但总体而言，在处理数据的经济/金融方面，标准和方法仍然缺乏。

创收途径（见图2）可提供必要的激励，使数据在建筑拆除前（甚至拆除后）得到维护和更新。在可持续材料流的循环型未来城市中，建筑数据资产发挥着至关重要的作用 [17], [18]。建筑数据资产还有许多潜在用例，例如可向专门从事建筑材料采矿和回收利用的实体提供有关建筑构件及其材料的信息，从而促进循环型建筑材料经济的发展。

IV. 系统模型与设计目标

A. 系统模型

We identify the followi[ng sta] kehold[ers an] d servi[ce prov] iders（见图 4）。1）**承包商** 是负责收集所需数据（例如建筑数据或电力数据）、按规定格式将其数字化，并提供给建筑所有者的人员。2）**数据资产所有者** 是拥有建筑数据所有权的人员。数据资产所有者是建筑所有者，或与该建筑关系密切的人员。资产所有者可以一次性或定期聘用承包商。通常，数据资产归建筑所有者所有，或由信息资产管理公司向建筑所有者购买。3）**数据认证者** 是一个或多个具备相应能力并获授权的人员，代表资产所有者对建筑数据（或其组成部分）的正确性进行实地核验，然后对带时间戳的数据进行数字签名代表资产所有者提供建筑数据（或其组成部分），随后由资产所有者对带时间戳的数据进行数字签名（图 4 中未显示）。

4) 代币化公司/实体 充当物理世界与区块链世界之间的桥梁。它们负责将数据资产代币化，并将这些代币提供给建筑所有者。5) **数据存储服务提供商** 用于满足存储需求。数据存储有两种类型——云存储和公有区块链。云存储服务按订阅方式托管/租用，用于存放数据存储库。数据资产在公有区块链上进行代币化。6)**信息用户/消费者** 可以是任何个人、群体或组织，他们通过查询使用数据资产所有者持有的数据，并从中获利地分析出有用的洞见。数据所有权仍归资产所有者所有。消费者获准使用这些信息，但不得出售。消费者需为收到的信息付费。7) **投资者** 可以是任何公众成员（个人或机构），他们购买代币以获取股息（版税），并进行交易。

B. 设计目标

以下是主要的设计目标。

1) 代币化资产的自由访问与转移：建筑数字资产不应被锁定在“许可型”平台中，以便利益相关者之间能够自由转移，且不局限于任何特定群体、联盟或其他组织的成员。这样做是为了避免形成信息孤岛。

2) 代币化资产的抗审查性与防篡改性：建筑数字资产应具有高度的抗审查能力，即能够抵御拒绝服务攻击（例如拒绝服务 [19]或交易审查）。防篡改性旨在防止未经授权的修改。

3) 代币化资产的原子性：资产所有者可能持有建筑中与材料和服务相关的多个资产。每项资产都是原子的。例如，两个不同的特殊利益团体合并为一个团体后，可能无法在单个资产或

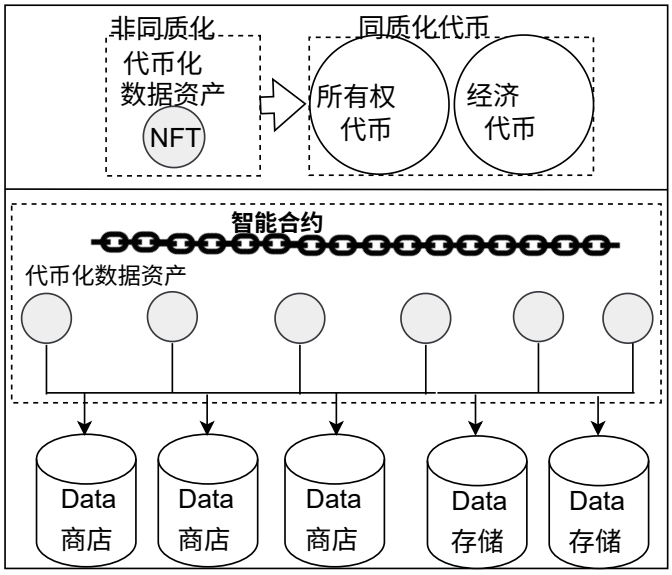

图 3. 每项数据资产都被代币化为非同质化代币。非同质化代币能够唯一地代表相应的数据资产。每个非同质化代币都对应两种类型的同质化代币，分别是所有权代币和经济代币。每个非同质化代币都指向其在数据存储库中的存储位置。

数据组件中找到所需的综合信息。他们可能必须分别查询这两项资产。这种划分简化了资产经济的管理。

4) 数据资产安全：提供安全保障有两个必要原因。首先，只有在数据资产的记录能够受到保护，避免所有权篡改、非法更改，以及在资产交易和无争议结算过程中遭受未经授权的访问时，该数据资产才有价值。在信息可以被买卖的公共环境中，这一点至关重要。第二个原因是，只有归属明确且受到控制的数据才能出售。

5) 维持运转的经济激励：为了提供并维护服务，我们主要依靠可持续的合作激励机制和用于协调的代币，而不是利他主义或监管执法（后者可能导致人们仅采取最低限度的行动以满足合规要求）。

V. 系统架构

本节介绍建筑数据资产生态系统的组成部分及其相互连接关系。我们还介绍用于协调各利益相关者的代币。图 3 展示了所使用的代币，图 4 展示了系统架构。合作的基础是激励，协调的基础则是代币 [18], [20]。我们以建筑资产为例，展示激励与代币（即合作与协调）之间的相互作用。

A. 生态系统代币

在我们的建筑生态系统中，代币用于弥合买方（数据消费者）与卖方（建筑数据所有者）之间的差距。通过激励业主，它能够促使稀缺但有价值的建筑数据在相互合作下得以共享。我们的建筑生态系统使用 3 种代币——其中一种是非可替代代币，其余两种是可替代代币（见图 . 3).

1) 非同质化代币。 非同质化代币（NFT）可唯一标识数据资产。与 NFT 对应的两种可替代代币分别是所有权代币和经济代币。

2) 所有权代币。 所有权代币是可替代的，用于促进部分所有权销售。当建筑物或其单元更换所有者，和/或新的建筑数据资产管理公司购买该建筑的信息权时，可能会出售所有权（或其中一部分）。任何数据资产都可以拥有一个或多个所有者，并由所有权代币持有者的联合多数同意规则决定该数据资产的权利（争议解决）。所有权代币仅出售给其他建筑业主以及与该建筑密切相关的人员（例如建筑数据资产管理公司）。

3) 经济代币。 建筑数据所有者可以在公有区块链上向个人/机构投资者出售这类可替代代币，以筹集资本，或支付资产代币化及其维护成本（包括支付承包商费用和存储费用）。经济代币持有者持有该代币即可获得版税，也可以在去中心化交易所进行交易以获利。

B. 生态系统启动与互联

启动建筑生态系统并使其运行所需的一系列步骤如图 4 所示。首先，建筑业主聘请承包商收集建筑数据（步骤 1，图 4），随后承包商按照规定的数字文件格式将数据交付给业主（步骤 2，图 4）。授权专家代表业主对数据进行认证并添加数字签名（图 4 中未显示）。此外，建筑业主无需具备技术专长。他们借助代币化公司/实体的服务发行代币。业主与代币化器签署具有法律约束力的合同（步骤 3，图 4）。根据该合同协议，代币化器铸造[1]（发行）签署合同中约定的代币，并将其发送给业主（步骤 4，图 4）。所有权代币[2]和经济代币可在与建筑生态系统相连的去中心化交易所（DEX）上出售（步骤 5 和 6，图 4），以换取资金。此外，必须能够搜索数据资产（NFT）所指向的数据存储库中的信息，同时不泄露其中的大量信息。这可以通过

[1]可以使用任何代币化实体。不过，生态系统只接受遵循同一套规则的数据资产接入，而这些规则由其利益相关者共同商定。与代币化实体签订的合同具有法律约束力，以防止其任意铸造代币。与加密货币（不受任何司法管辖区管辖）不同，建筑数据资产始终与实体建筑有内在联系，而该建筑位于某个司法管辖区。因此，这一实体资产的建筑数据资产应由同一监管机构监管。

[2]所有权代币的销售可能还会受到进一步限制，因为这些代币仅供出售给其他建筑业主或与该实体建筑密切相关的人。这可能是建筑所有者与代币化器之间法律合同的一项条件。由于建筑物位于特定的实体司法管辖区内，管辖这些建筑物的法律也适用于该司法管辖区。去中心化交易所仅作为代币无需信任的交易平台。

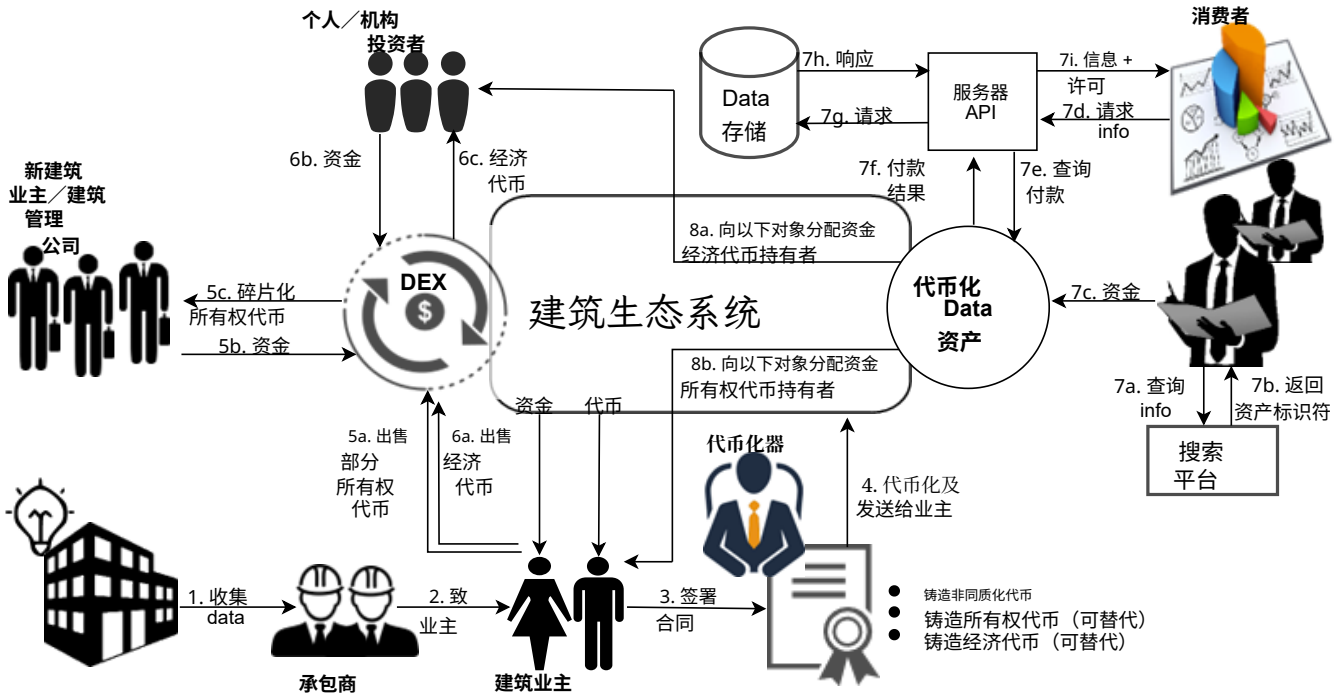

图 4. 启动和运营建筑生态系统的步骤顺序——1. 承包商收集建筑数据，并将 2. 数据传递给建筑业主。3. 建筑业主与代币化器签署具有法律约束力的合同。4. 代币化器根据法律合同约定发行/铸造所有代币，并将其发送给业主。业主使用去中心化交易所（DEX）出售代币，5. 可以出售部分所有权代币，或 6. 使用经济代币筹集资本。此外，对建筑数据感兴趣的消费者可以 7a. 在搜索平台上查询指向所需信息的代币化数据资产的 7b. 资产标识符（NFT 合约地址）。确定地址后，7c. 消费者向区块链上的正确 NFT 合约地址付款。7d. 接下来，消费者向服务器请求数据存储库中的信息。7e. 服务器查询 NFT 合约，以验证是否已支付所需款项。7f. 确认付款后，7g. 服务器向数据存储库请求由 NFT 合约地址标识的数据，7h. 数据存储库则返回数据。根据查询结果，7i. 将所请求的信息和许可发放给消费者。消费者为代币化数据资产（NFT）支付的款项即为步骤 7c.，并根据 NFT 智能合约中的规则，按比例分配给 8a. 经济代币和 8b. 所有权代币持有者。

作为生态系统一部分的在线定制搜索平台允许任何感兴趣的消费者发起查询（步骤 7a，图 4），并返回代币化数据资产（NFT）的标识符（步骤 7b，图 4）。获取资产标识符后，消费者即可在区块链上向相应的 NFT 合约付款（步骤 7c，图 4）。确认付款并验证用户身份后，系统将批准请求，以便从数据存储库中检索所需信息（步骤 7d-7i，图 4）。消费者为代币化数据资产（NFT）支付的资金中，50% 按比例分配给经济代币持有者，剩余的 50% 按比例分配给所有权代币持有者（步骤 8a-8b，图 4）。资金分配由 NFT 智能合约中的规则强制执行。

VI. 讨论

A. 代币持有者的经济激励

每项数据资产（非同质化代币）都会发行一对相应的所有权代币和经济代币（见图 3）。面向消费者提供的服务采用数据许可模式。每位消费者向 NFT 合约地址付款，以获得使用信息的许可（见步骤 7c、图 4）。经济代币和所有权代币持有者将获得代币化现金（如稳定币）股息。为此，支付款项

支付至 NFT 合约的款项（步骤 7c、图 4）将作为股息进行分配（见步骤 8a-8b、图 4）。这样一来，每当消费者向 NFT 智能合约地址付款时，经济代币持有者都能确保获得付款——因为每项数据资产仅对应建筑中一小部分的商品/服务。因此，分配依据是总收入，而非净收入。分配规则由智能合约执行。经济代币持有者将根据其代币持有量，按消费者所付资金的 50% 获得代币化现金股息支付。其余 50% 则按比例分配给通过所有权代币确定的数据资产所有者。在此规则下，所有者受到激励，会继续持有所有权代币并努力增加收入，因为他们只有持有所有权代币时才能获得股息支付。该规则由智能合约执行。

B. 去中心化交易所（*DEX*）

去中心化交易所（DEX）是在智能合约上运行的完全去中心化交易所（例如，运行在以太坊区块链上的 aERC20 去中心化交易所）。它被纳入建筑生态系统中，以便买方与

卖方之间能够无需信任地转移代币。代币化器为数据资产铸造的代币（见步骤 4，图 4）包括一个非同质化代币（NFT）及其对应的可替代代币——经济代币和所有权代币。这些代币作为与代币化器签订的法律合同的一部分转交给建筑业主。非同质化代币用于指向信息在数据存储库中的位置，并允许消费者向非同质化代币合约地址进行支付转账。只有可替代代币会在去中心化交易所上出售。建筑所有者可以通过在去中心化交易所出售所有权代币，出售部分或全部所有权权益（步骤 5a–5c，图 4）。她也可以通过出售经济代币筹集资本（步骤 6a–6c，图 4）。筹集的资金通过去中心化交易所转给卖方（所有者）。为确保所有权仅在建筑业主或与建筑密切相关的人士之间转让，只有白名单利益相关者才能从去中心化交易所购买所有权代币。经济代币的出售不受限制，因为其面向公众，即个人及散户投资者。

C. 搜索平台

搜索结果指向数据存储库中的建筑数据。每位数据资产所有者都会将其建筑数据保存在数据存储库中[3]，并将非同质化代币指向其存储位置。为避免孤岛式运作，搜索必须覆盖整个生态系统。为此，数据消费者通过公共网络应用程序进行交互，该应用程序充当建筑数据的搜索平台（步骤 7a，图 4）。在我们的架构中，任何用户都可以自由使用搜索平台。如果所请求的数据可用，搜索将返回 NFT 合约地址和许可费用，以供消费者支付（步骤 7b，图 4）。确认付款后，信息便会从数据存储库中释放。由于消费者需要为信息付费（步骤 7c，图 4），因此他们明确期望搜索引擎返回的内容正是所请求的信息。在此，消费者搜索的不是洞见，而是特定的建筑数据。之后，再通过处理从数据存储库中检索到的数据得出洞见。在我们的系统架构中，承包商必须将信息按照规定的数据格式提供，作为其日常工作的一部分。这样做是为了简化在源头收集结构化建筑数据的过程，并使搜索更加顺畅。

D. 数据认证方

建筑信息在发送至数据存储库之前，由相关认证专家进行认证。所有认证专家的公钥均由密钥存储智能合约管理和更新（图 4 中未显示）。首先，专家对数字化信息进行实地核验、添加时间戳并进行数字签名，然后将其交给业主。接下来，业主将经认证的数据上传至数据存储库，并将相应的非同质化代币指向其存储位置。此外，任何从数据存储库获取信息的消费者，都可以从智能合约中读取认证方（签名者）的公钥，并验证数据上的签名，以核实数据真实性。

[3]通常会使用数据托管公司或服务。

审计是数据资产的一项基本要求（第二节 II-A 节中的要求 R4）。数据认证者开展的认证是一种审计形式，因为它会检查数据是否存在缺陷。这有助于加强问责，因为它能够发现数据中需要解决的问题，并将这些问题告知数据所有者。此外，数据所有者可以与承包商协商，纠正数据中的缺陷，使其能够通过认证并被确认为正确。通过在数据存储库中将数据标记为已审计或未经审计，消费者便可根据自身偏好，仅为经过审计的数据付费。

E. 建筑数据资产示例用例

我们介绍 4 种示例用例，以说明建筑数据资产的应用。

1) 维护。 这是建筑物中常见且重复发生的活动。例如，额外铺设电气布线和改进布线可能需要业主聘请承包商来完成。电气布线图可以帮助承包商判断抹灰墙壁后方的位置，从而节省时间和精力。电气布线图数据可以转化为数据资产。管道图也是如此。它可以帮助承包商判断墙壁后方和地下管道的位置，从而节省时间和精力。了解管道的位置和布局，可以避免意外挖掘以及服务中断。

2) 分析与洞察。 个人以及数据分析公司/研究人员都可以使用建筑数据。例如，i.) 租住新公寓的个人可能会对历史公用事业账单（如电费和水费）感兴趣。她可以要求业主提供这些信息，但业主没有动力提供。如果公用事业账单在我们的生态系统中属于数据资产，租户就可以在我们的搜索平台上查找这些信息，在区块链上支付费用，并从数据存储库中无缝获取这些信息。ii.) 对于数据分析公司而言，将用电量信息与建筑内各单元的位置（位于哪一层）和朝向（面向建筑的哪一侧？）信息结合起来，可能会得出这样的洞见——避免选择高层且朝西的单元，以免电费过高。

3)寻找可重复使用和可回收的建筑材料。资源可用性和分配是建筑施工中资源调度的重要组成部分。大量废弃材料最终被送往垃圾填埋场，却无意回收利用或再利用，这给寻找新的资源带来了压力。因此，消费者日益关注建筑物寿命终结时可回收和可重复使用的信息 [14]。这些信息，加上拆解信息 [15], 、位置和可用性数据，将提供必要的信息，以确定为新建/翻新项目分配资源的时间安排。这些信息可以转化为数据资产。

4) 临时工程。另一个潜在应用是在临时工程中 [21], [22] （例如，用于通行的脚手架、用于混凝土浇筑的模板支撑工程、用于挖掘

地球的挖掘机以及用于吊运材料的起重机）。这构成了建筑施工中临时重复使用的有限资源的很大一部分。尽管它们通常不属于已完工的建筑，但在建筑施工过程中发挥着至关重要的作用。了解其可用性对于资源分配和避免延误至关重要。它们可以在我们的生态系统中代币化为数据资产。其消费者随后可以搜索这些资源的可用性，使我们能够连接资源/服务的买方和卖方。

F. 关于需求 *R1*：防止任意复制

根据需求 R1（见第 II-A 节），必须确保数据资产不可能被任意复制。R1 是数据成为资产的一项重要需求。任何能够随意（轻易）复制的数据最终都没有价值。防止消费者查看过的数据被复制是一个棘手的问题。已知的缓解措施包括对违反数据许可条款的行为追究法律责任。因此，当前许多技术工作都着眼于防止任意复制存储在数据存储库（由托管方管理或存储于 IPFS）中的数据。现有解决方案通过结合加密和/或访问控制 [23] 来满足数据存储库中的这一需求。为确保所用代币具备唯一性，这些代币会在区块链上发行。区块链提供的安全性可以防止代币被任意复制。

G. 使用区块链的原因

区块链可用于构建一个全球性的生态系统，汇集建筑数据资产、相关服务和企业。它也可充当中立的结算层。第二节第 II-A 节讨论了数据资产的要求。根据 R2，数据资产的所有者必须能够占有该资产并对其实施排他性控制。因此，强有力的控制功能是必要条件。智能合约中嵌入并通过区块链节点共识执行的控制规则，可用于满足这一要求。根据 R3，数据资产必须能够接受监管机构的监管（如有需要）。由于我们处理的是数据，为满足监管要求，必须对所有交易进行记账。区块链能够保证记账透明且不可篡改。根据 R4，必须能够审计数据资产（例如，验证其完整性并检查是否存在任何损坏）。防篡改能力和身份验证是任何审计的重要要求。在更强的（拜占庭对手）威胁模型下，区块链具有防篡改能力，且所有信息都经过数字签名。根据 R5，必须能够从数字资产中提取有用信息，从而创造收入来源。能够顺畅、安全地支付和购买是满足这一要求的必要条件。交易（买入/卖出）可以在区块链上运行的去中心化交易所中以无需信任的方式进行。中心化解决方案虽然速度更快，但由于能够封锁、冻结或锁定资产，交易可能不那么顺畅。区块链作为一种工具，也满足了数据资产的许多要求。因此，我们将区块链用作实现数据资产的工具。

VII. 相关工作

本节综述建筑与施工行业所采用的现有数据收集方法。Milojevic-Dupont 等人 [24] 的研究依赖开放的政府数据集，以及一个名为 OpenStreetMap [25]、由众包志愿者提供地理信息的数据库。他们构建了 EUBUCCO 科学数据库，其中收录了欧盟 27 个国家和瑞士近 2.06 亿栋建筑的单体建筑轮廓，并纳入了三项主要属性——建筑类型、高度和建造年份；这些属性分别覆盖了 45%、74% 和 24% 的建筑物。Bide 等人 [26] 的研究使用了可免费获取的地球观测卫星数据，表明河内的发展规划远超实现其完工目标所需的资源规划。其他数据收集技术包括使用配备激光雷达 [27] 等传感器的无人机，以及利用摄影图像或其他电磁辐射影像模式进行摄影测量 [28]。Wurm 等人 [29] 的研究利用基于深度学习的方法，从航空影像生成建筑存量数据，用于能源需求建模，旨在减少能源消耗。Heeren 和 Hellweg [30],使用瑞士国家数据库构建了三维建筑表示。增强型地理信息系统 [31]（包括地理空间信息，例如来自遥感卫星、无人机和激光雷达的数据）以及摄影测量技术的进步，日益助力建筑数据收集。我们观察到，一些主要数据来源是官方政府数据集 [30], [32]。其他来源包括遥感数据（例如，使用配备传感器的无人机 [33] 进行飞行采集，或使用卫星影像）。一些缺失信息也通过机器学习 [9] 进行补充，以提高数据质量。其他机器学习技术则利用公开可用的图像数据库，自动识别城市区域 [34]中的建筑类型。

VIII. 结论与未来工作

我们提出了建筑数据资产架构，以激励卖方（建筑数据所有者）与买方（信息消费者）进行建筑数据交易。数据所有者要求其承包商以规定的数字格式提供信息。将数据收集作为承包商日常工作的一部分，减少了数据碎片化；规定的格式则提升了数据一致性。消费者能够通过公共搜索平台查找建筑信息。这避免了孤岛式运作，并实现了数据的实时通信（数据在数据存储库中更新时即可同步）。数字化还免去了人工翻阅纸质副本的过程，大幅加快了对通信查询的响应。使用我们构建的生态系统显著提升了数据可见性。建筑数据认证流程起到了审计的作用，有助于提升问责水平。人们可以通过该平台便捷地搜索建筑数据，在区块链上付款，并从数据存储库中检索数据。

Goy 等人 [35] 的研究提出，应加强数据所有者与数据用户之间的沟通（例如，通过

研讨会和年度会议）。我们的架构未考虑在线论坛或年度会议等带外反馈机制，供数据所有者了解消费者不断变化的需求。改善买方与卖方之间的沟通，对于收集所需数据以及维持生态系统的可持续性至关重要。带外沟通技术及其整合不在当前工作的范围之内，将留待未来研究。

致谢

本研究由国家研究基金会通过其卓越研究与技术企业校园（CREATE）计划资助。

参考文献

[1] M. Hill，《灰色能源：房地产行业的未来议题》，2021年，https://www.ece.com/en/blog/asset-classes/gray-energy。[2] Swilling 等人，《国际资源委员会（2018年）。城市的重量：未来城市化的资源需求。国际资源委员会报告。联合国环境规划署，肯尼亚内罗毕。》技术报告，2018年。[3] I. R. P. 联合国环境规划署，《2019年全球资源展望：实现我们期望的未来所需的自然资源》，2019年。[在线]。网址：https://wedocs.unep.org/20.500.11822/27517[4] 美国环境保护署，《建筑和拆除材料的可持续管理》，2023年2月7日，https://www.epa.gov/smm/sustainable-management-construction-and-demolition-materials。[5]美国环境保护署，《推进可持续材料管理：2018年情况说明书——评估美国材料产生与管理的趋势》，2020年12月，https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/2018 ff fact sheet dec 2020 fnl 508.pdf。[6] 美国环境保护署，《减少、再利用和回收建筑和拆除材料的最佳实践》，2022年6月22日，https://www.epa.gov/smm/ − − − − − − − b − est-practices-reducing-reusing-and-recycling-construction-and-demoliti

[7] W. Y. Pei、F. Biljecki 和 R. Stouffs，《城市尺度建筑存量建模数据集：潜在数据收集方法的识别与综述》，《国际摄影测量与遥感学会摄影测量、遥感与空间信息科学年刊》，第 X- 4 2 2022, 225 232, /W 卷，第 – 页。2022 [ ] 在线。可访问：https://isprs-annals.copernicus.org/articles/ X-4-W2-2022/225/2022/[8] I. Seif，《建筑数据不完整这一最大难题及其解决方法》，访问日期：2023年4月1日，https://cfma.org/articles/the-biggest-problem-with-incomplete-construction-data-and-how-to-fix-it-l.

[9] Z. Yang、F. Xue 和 W. Lu，《处理建筑废弃物管理中的缺失数据：基于汇总废弃物产生行为的机器学习》，资源、保护与回收，第175卷，第105809页，2021年。[10] N. Kohler、P. Steadman 和 U. Hassler，《建筑存量及其应用研究》，《建筑研究与信息》，第37卷，第5-6期，第449–454页，2009年。[11] N. Kohler 和 U. Hassler，《建筑存量作为研究对象》，《建筑研究与信息》，第30卷，第4期，第226–236页，2002年。[12] A. Holtmann，《如何简化现场建筑数据收集》，2019年6月7日。 [在线]。网址：https://www.viewpoint.com/en-gb/blog/how-to-simplify-construction-data-collection-from-the-field [13] A. Barone，《什么是资产？定义、类型和示例》，2022年，https://www.investopedia.com/terms/a/asset.asp。[14] M. Honic、I. Kovacic、P. Aschenbrenner 和 A. Ragossnig，《建筑寿命终止阶段的材料护照：挑战与潜力》，《清洁生产杂志》，第319卷，第128702页，2021年。[在线]。网址：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621029012[15] B. Sanchez、C. Rausch、C. Haas 和 T. Hartmann，《支持建筑构件再利用的基于BIM的拆解模型框架》，资源、保护与回收，第175卷，第105825页，2021年。 [在线]。网址：https://www.sciencedirect.com/ science/article/pii/S0921344921004341

[16] S. C.etin、C. De Wolf 和 N. Bocken，《循环数字化建成环境：一个新兴框架》，《可持续性》，第13卷，第11期，第6348页，2023年6月 2021 [ ] 10 3390 13116348 。在线。网址：[17] http://dx.doi.org/ 。/su H. Aydt、G. Habert、D. Hall、S. Hellweg、P. Herthogs、v. Richthofen、Aurel 和 R. Stouffs，《行动74：实现可持续材料流动》。苏黎世：Lars M¨uller Publishers，2022年，第200–201、308–311页，证据74：实现可持续材料流动，第308–311页。[18] J. J. Hunhevicz，《探索区块链和加密经济学在建筑业中的潜力》，博士论文，苏黎世联邦理工学院，2022年。[19] MSISAC，《了解拒绝服务攻击》，2022年，https://www.cisa.gov/uscert/ncas/tips/ST04-015。[20] R. Lamberty、D. de Waard 和 A. Poddey，《引领数字社会经济提升效率——代币经济学入门》，2020年。 [在线]。网址：https://arxiv.org/abs/2008.02538[21]HKICM1，《各类临时工程/模板支撑工程简介及其对工作规划和成本的影响（第1部分）：HKICM举办的研讨会演示材料，属于“建筑管理专业实践”培训课程系列》，2018年10月12日。 [在线]。网址：https://const-infobank.org/wp-content/uploads/2018/10/Temp-work-part-1.pdf[22] HKICM2，《各类临时工程/模板支撑工程简介及其对工作规划和成本的影响（第2部分）：HKICM举办的研讨会演示材料，属于“建筑管理专业实践”培训课程系列》，2018年10月12日。 [在线]。网址：https://const-infobank.org/wp-content/uploads/2018/10/Temp-work-part-2.pdf [23] S. Venugopalan 和 H. Aydt，《提升非同质化代币引用数据存储的机密性》，CoRR，第abs/2301.05941卷，2023年。 [在线]。网址：https://doi.org/ 10 48550 2301 05941 。/arXiv. 。N. [24] Milojevic-Dupont、F. Wagner、F. Nachtigall、J. Hu、G. Br¨user、M. Zumwald、F. Biljecki、N. Heeren、L. Kaack、P.-P. Pichler 和 F. Creutzig，《EUBUCCO v0.1：欧洲建筑存量特征——包含数百万栋独立建筑的开放式通用数据库》，《科学数据》，第10卷，2023年3月。[25] J. Jokar Arsanjani、A. Zipf、P. Mooney 和 M. Helbich，《地理信息科学中的OpenStreetMap导论：经验、研究与应用》，2015年3月，第1–15页。[26] T. Bide、A. Novellino、E. Petavratzi 和 C. Watson，《利用地球观测自下而上的建筑矿物建筑存量量化方法：以河内为例》，《清洁环境系统》，第8卷，第100109页，2023年2月。[27] A. Alsayed 和 M. Nabawy，《利用无人机搭载的可操控单点激光雷达进行室内堆料重建》，《无人机》，第6卷，第386页，2022年11月。[28] O. Ajayi 和 J. Aju- lo，《研究无人驾驶航空器（UAV）摄影测量在估算堆料体积中的适用性》，《地理学问题》，第40卷，第25–38页，2021年1月。[29] M. Wurm、A. Droin、T. Stark、C. Geiß、W. Sulzer 和 H. Taubenb¨ock，《基于深度学习的遥感建筑存量数据生成：用于城市热需求建模》，《国际摄影测量与遥感学会国际地理信息杂志》，第10卷，第1期，2021年。[30] N. Heeren 和 S. Hellweg，《跨时空追踪建筑材料：建筑存量和建筑材料流的前瞻性地理参考建模》，《工业生态学杂志》，第23卷，2018年3月。[31] R. Buffat、A. Froemelt、N. Heeren、R. Martin 和 S. Hellweg，《用于建筑存量建模新方法的大数据地理信息系统分析》，《应用能源》，第208卷，2017年11月。[32] 新加坡开放政府产品，《基础设施一览》，访问日期：2023年4月11日。 [在线]。网址：https://data.gov.sg/ group/infrastructure [33] E. Alohan，《探索建筑建模和无人机在建筑施工中的作用》，硕士论文，ume˚a大学，2019年。 [在线]。网址：https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1349142/FULLTEXT01.pdf [34] F. Ghione、S. Mæland、A. Meslem 和 V. Oye，《利用机器学习进行建筑存量分类：挪威奥斯陆案例研究》，《地球科学前沿》，第10卷，第886145页，2022年6月。[35] S. Goy、F. Mar´echal 和 D. Finn，《城市尺度建筑能源建模数据：评估影响并克服数据可用性挑战》，《能源》，第13卷，第4244页，2020年8月。

关于材料