



移動型ロボットアームによる 3D スキャンデータへの物理特性の付加

Adding physical properties to 3D scan data using a mobile robotic arm

高下修聡¹⁾, 中根敦久²⁾

Shuto TAKASHITA, and Atsuhisa NAKANE

1) 東京大学大学院学際情報学府 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

2) 東京大学 工学部計数工学科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

著者 1 と 2 は本研究に同等に寄与する

概要: 近年のメタバースの発展とともに, 3D スキャン技術を用いたデジタルツイン空間の構築に注目が集まっている. しかしながら, 3D スキャンされたデータはその色と形状しか保存しておらず, VR 体験やシミュレーションに有用であると考えられる質量や重心, 導電性などの物理特性を失っている. そこで本研究では, 移動型ロボットアームを用いて現実世界に存在する物体の様々な物理特性を測定し, 自動でデジタルツイン空間に転送するシステムを開発した.

キーワード: デジタルツイン, バーチャルリアリティ, ロボット, デジタルアーカイブ

1. 背景

近年のメタバースの隆盛に伴い, バーチャルな旅行などを目的として, 現実空間をデジタル空間で仮想的に複製するデジタルツイン技術へ注目が集まっている. デジタルツインは, 狭義には現実空間とデジタル空間のリアルタイムかつ双方向の情報交換があり, 分析や予測に役立てることができる動的なモデルを指すが, 広義には静的な現実空間を模した 3D モデルもデジタルツインと呼ばれる [1]. 広義のデジタルツインの例として, VRchat 等のソーシャル VR プラットフォームにも, 現実の名所やユーザの家などの 3D モデルがワールドとして多くアップロードされている. これらのモデルは主にフォトグラメトリや LiDAR, NeRF[2] などカメラベースの手法で生成され, 軽量化やインタラクションの追加などの処理を施された後にアップロードされる.

しかし, カメラベースの 3D スキャン技術で生成された 3D モデルは, 生成された時点では現実空間の視覚的情報 (色および形状) を再現するのみであり, 重さなどの物理特性は失われている. その為, これらのモデルを単に置いただけのデジタルツイン空間では物体の物理的挙動は現実には即したものとなり得ず, 限定的な VR 体験を産んでいる. また, 狭義のデジタルツイン技術の大きな応用先である物理シミュレーションにも用いることができない. この課題に対して, モデルに対して後処理的に物理特性を付与することや, そもそも 3D スキャンでモデルを作るのではなくモデリングソフトでモデルを作成することもできるが, それぞれ多大な手間を必要とする場合がある. そこで, 視覚的情報に留まらずその他の物理特性をも再現したデジタルツイン空間を簡単に生成する技術が望まれる.

2. 目的

本稿では, カメラベースに生成された視覚的情報のみを保持するデジタルツイン空間に対して, 現実空間から計測した物理特性を新たに付与するシステムを提案する. 特に, 日常生活の場など, オブジェクトが乱雑に配置されており, 物理特性を一つ一つ手入力することや手作業で 3D モデリングを行うことが難しいアンストラクチャードな空間を対象にしている. 物理特性の計測からデジタルツイン空間への情報の付与までの一連のプロセスを手作業で行う場合, 空間の広大化や計測する物理特性の数の増大によって, 時間的・金銭的成本が増すと考えられる. そこで, 本研究ではロボットによる当プロセスの自動化を試みる.

3. 提案システム

本システムは, 移動型ロボットアームを用いて物理特性を計測し, その情報を視覚的情報のみを保持するデジタルツイン空間に自動的に付加するものである. ロボットアームが現実空間の物体を把持し, 重量や導電性などの物理特性を計測する. 計測された情報はロボットアームを動作させる PC からデジタルツイン空間を動作させる PC に自動的に転送され, デジタルツイン空間の対応するオブジェクトに情報が付加される. これにより, デジタルツイン空間内での物理的挙動はより現実に即したものとなることが期待される.

本稿では, デジタルツイン空間の 3D モデルは事前に生成されており, また物理特性を計測したい各物体は空間からオブジェクトとして事前に分離される. ただし, 将来的には, デジタルツイン空間の生成やオブジェクトの分離をも含んだ一連のプロセスを自動化することを考えている.



図 1: 移動型ロボットアーム (TOYOTA HSR)

4. 試作物

提案システムの実現可能性・有効性を確認するため、最低限の機能を持つ試作システムを作成し、簡易的なタスクを実行した。

4.1 プロトタイプ構成

本試作システムでは、物理特性のうち特に物体の質量と導電性を取り扱う。現実空間内の物体からこれらの情報を計測してデジタルツイン空間に転送するシステムを構築し、それによりデジタルツイン空間内の物体の物理的挙動が変化することを確認する。

移動型ロボットアームとして TOYOTA HSR [3] を使用する。物体の質量はアーム本体に搭載されたセンサを用いて計測した。物体の導電性は、アームに新たに取り付けられた抵抗センサを含む電子回路によって計測された (図 1)。

本システムは一連の計測・データ転送のロボットによる自動化を目指したものであるが、試作システムでは、アームはコントローラを通じた人間の操作によって Wizard-of-Oz 的に制御される。アームで何らかの物体を把持した状態でコントローラの特定のボタンを押すことで、物体の物理特性 (質量及び導電性) を計測し、得られたデータを Unity で作成されたデジタルツイン空間に転送する。計測している物体とオブジェクトとの対応づけは、事前に定めた計装・転送順に則って行われている。

4.2 簡易シナリオにおける動作実証

VR 空間内で物体の物理特性を用いた体験を可能にさせる簡易シナリオにおいて、試作システムの機能を検証した。本シナリオでは、スキャンされた部屋の中にあるアルミ缶とペットボトル (図 2) に対し、現実でそれらの導電性及び質量をアームが測定して情報を転送することで、それらの物理特性を反映したインタラクションが行えるようになる。用いたアルミ缶は質量がおおよそ 300 g で側面に導電性があり、ペットボトルは質量がおおよそ 500 g で側面に導電性がない物体である。値が転送される前のデフォルト値としては、VR 空間内のそれぞれのオブジェクトに質量 0 g、導電性なしが

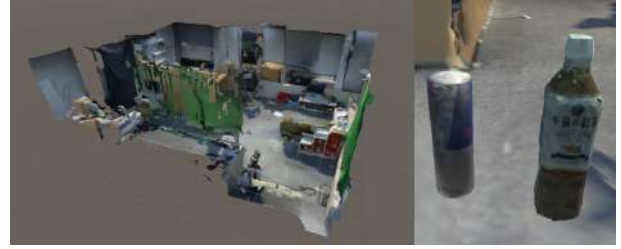


図 2: 部屋とオブジェクトの 3D モデル (左: アルミ缶, 右: ペットボトル)。



図 3: 物理特性の計測

設定されている。

VR 空間内には、オブジェクトの物理特性によって挙動が変化するシーソーとランタンを用意する。シーソーの挙動は、両側に置かれる 2 つのオブジェクトの質量に依存しており、オブジェクトの質量が等しければ釣り合い、差があれば重いオブジェクトの置かれた方へ傾く。ランタンは導通していない電気回路を模しており、設置された箱の中に導電性のある物体を入れた場合のみ点灯する。物理特性を計測・転送する前は、デフォルト値に従って、両物体はシーソーに置くと釣り合い、ランタンの箱に設置してもいづれもランタンは点灯しなかった。

デフォルト値では現実の物理特性を反映した挙動が得られないことを確認した後に、試作システムを用いて現実空間の物体から質量及び導電性を計測し、VR 空間の対応するオブジェクトに転送した (図 3)。転送後、VR 空間内の挙動は変化し、シーソーはペットボトルを配置した側に傾き、ランタンはアルミ缶を箱に入れた場合のみ点灯した (図 4, 5)。このように、本試作システムを用いることで、VR 空間内の物理的挙動を現実空間のそれに近づけられることが確認できた。

5. リミテーション・今後の展望

本稿では、物体の視覚的情報に留まらない物理特性を保存したデジタルツイン空間を自動で生成するシステムを提案し、また試作システムと簡易シナリオを通じてその動作を確かめた。しかしながら、当システムがユーザー体験に与える影響は検討されていない。今後は、ユーザー体験に関わるア

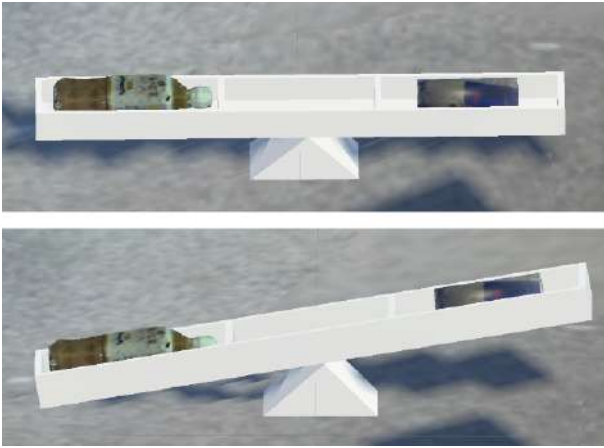


図 4: 計測・転送前後のシーソーの挙動の変化



図 5: 計測・転送前後のランタンの挙動の変化（アルミ缶を入れた場合）

ンケート [4] や質的インタビューの手法を用いて、物理特性の再現がユーザー体験に与える影響やその応用可能性を検討する予定である。また、システムの限界として、移動式ロボットアームが動作できない空間が存在することが考えられる。本システムはアンストラクチャードな空間の物理特性を含めたデジタルツイン化を目的としているため、ロボットの移動に必要な幅や床面の乱雑さを評価し、またより多くの空間で使用可能なハードウェア系を構成することが必要であると認識している。

また、本稿における試作システムはアーム操作者の介入を必要とする簡易的なものであり、よりリッチなシステムを製作することも検討している。第一に、より多くのプロセスを自動化することを目標としている。物理空間において、動かせるオブジェクトとそうでないオブジェクトを判別し、動かせるオブジェクトについてのみ物理特性を自動的にアームが移動して取得することができれば、労力の削減に繋がる。また、3D スキャンとデジタルツイン空間の作成のプロセス自体をアームに自動的に行わせることも検討している。第二に、アームの機能拡張を行いより多くの物理特性を取得することも検討している。例えば、重心位置・摩擦係数・柔らかさ・固有振動数（音）・表面の質感テクスチャなどが物理シミュレーションやリッチな VR 体験に有用であると考えられる。近年のハプティクス技術の発展に伴い、物体の表面テクスチャや重さを再現することは徐々に可能になってきているものの、それらが役立つコンテンツはまだ少ない。本システムを用いて物体の物理特性をより正確に取得することは、現実を仮想的に再現するバーチャルリアリティ技術・デジタルツイン技術にとって根本的に有益であると考えられる。

最後に、本システムのユースケースについて検討を行う。本システムは、物体の物理特性を一つ一つ手入力することが難しく物理特性を容易に再現することができない、アンストラクチャードな空間を対象にしている。例えば日常空間は、物体が乱雑に配置されており、また工業的に作られた規格品ではない物体や経年によって物理特性が変化した物体も含まれているために、物理特性を含んだデジタルツイン空間を作成することは難しい。同様に、歴史的な建築物や、被災後の建物なども、その物理特性を全て手作業で取得し再現することは難しい。これらのアンストラクチャードな空間を物理特性を含んでデジタルツイン化することが出来れば、バーチャル旅行やバーチャル帰省、バーチャル教育、バーチャル被災など、時と時間を超えた「ある瞬間・ある場所での体験」をより高精細に行うことができると考える。また、今後の VR 技術の発展を見越して、現状の VR 機器では再現できないような物理情報も含めアーカイブしておくことも有益である。

6. 結論

本稿では、色や形状に留まらない物理特性を保存したデジタルツイン空間を自動で生成するシステムを提案した。また実際に、質量及び導電性をロボットにより計測して既存のデジタルツイン空間に転送するシステムを試作し、簡易的なタスクを通じてその有効性を確認した。本報告は、アンストラクチャードな空間を物理特性を含めてデジタルツイン空間に再現する試みの第一歩であり、今後のデジタルツイン技術の発展の新たな方向性を提案するものである。

謝辞本論文の作成にあたり、TRAIL (Tokyo Robotics and AI Lab) の皆様には、実験設備の貸与とともに適切な助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] デジタルツインの現状に関する調査研究の請負成果報告書, 研究開発戦略センター, 2021.
- [2] Mildenhall, B., Srinivasan, P. P., Tancik, M., Barron, J. T., Ramamoorthi, R., and Ng, R. (2021). Nerf: Representing scenes as neural radiance fields for view synthesis. *Communications of the ACM*, 65(1), 99-106.
- [3] 山本貴史, 齋藤史倫, 橋本国松, 池田幸一. 生活支援ロボット HSR の開発. 第 30 回日本ロボット学会学術講演会, 2012.
- [4] Katy Tcha-Tokey, Emilie Loup-Escande, Olivier Christmann, and Simon Richir. 2016. A questionnaire to measure the user experience in immersive virtual environments. In *Proceedings of the 2016 Virtual Reality International Conference (VRIC '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 19, 1-5.