

仮想／再構築化ツインモデルを用いた 拡張現実世界の実現に関する検討

木村 梨沙¹ 中島 達夫¹

概要：本論文では、実世界と仮想世界を融合する拡張現実世界を構築するための概念モデルである仮想／再構築化ツインモデルを提案する。仮想／再構築化ツインモデルは実世界をモデル化するための有力な手段であるデジタルツインを拡張したモデルであり、実世界を拡張するデジタルサービスを構築するための汎用的な法論を提供する。また、仮想／再構築化ツインモデルを用いて既存の拡張現実世界のケーススタディの分析を行うことにより、仮想／再構築化ツインモデルが既存サービスの新たな可能性を示唆することを示し、それにより仮想／再構築化ツインモデルの有用性を示す。

キーワード：デジタルツイン、拡張現実感、概念モデル、仮想オブジェクト、デザインフレームワーク

A Study on Constructing Digitally Enhanced Real World based on Virtualizing/Reframing Twin Model

RISA KIMURA¹ TATSUO NAKAJIMA¹

Abstract: In this paper, we propose a conceptual model named the Virtualizing/Reframing Twin Model for constructing digitally enhanced real world. Virtualizing/Reframed Twin Model is a model to extend traditional Digital Twin that is a promising model for building various digital services. We also present an analysis of existing digital services to reveal their new opportunities to demonstrate the effectiveness of Virtual/Reframed Twin Model.

Keywords: Digital Twin, Augmented Reality, Conceptual Model, Virtual Objects, Design Framework

1. はじめに

社会のデジタルトランスフォーメーション (DX) は、過去 10 年間にわたって我々の世界の成長の原動力となってきた [25]。前世紀から、デジタル技術は、私生活、行政、産業構造、雇用など、社会の多くの側面を劇的に変化させ、私たちの日常生活を改変してきた。例えば、インターネットを用いることにより、いつでもすべてに接続することを可能とし、スマートフォンによりどこからでもデジタル情報にアクセスすることを可能としてきた。また、オペレーティングシステムが計算機システムを仮想化するように、デジタルプラットフォームは我々が生活するこの世界を仮想化することにより、より効率的に、より楽しく、より刺激的に、より快適に、より持続的に世界を改変してきた [14]。

デジタルツインモデルは、私たちの現実世界をモデル化するための有力なアプローチである [4]。このアプローチ

では、実世界に存在する”もの”のデジタル化されたレプリカが仮想世界内に作成される。デジタル化されたレプリカは、それらの対応する実世界のものに関するさまざまな情報を取得してモデルを作成し、現在の状態を分析し、それらの実世界に存在するものの使用法を最適化し、将来のリスクを予測するのにも用いられる。

本論文では、実世界と仮想世界を融合する拡張現実世界を構築するための概念モデルである仮想／再構築化ツインモデルを提案する。仮想／再構築化ツインモデルは実世界をモデル化するための有力な手段であるデジタルツインモデルを拡張したモデルであり、実世界を拡張するデジタルサービスを構築するための汎用的な方法論を提供する。また、仮想／再構築化ツインモデルを用いて既存の拡張現実世界のケーススタディを分析することにより、仮想／再構築化ツインモデルが既存サービスの新たな可能性を示唆する。これにより、仮想／再構築化ツインモデルの有用性を示す。

¹ 早稲田大学 基幹理工学部 情報理工学科
Waseda University, 3-4-1 Okubo Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan
{r.kimura, tatsuo}@dcl.cs.waseda.ac.jp

2. デジタルツイン

現実世界をモデル化するワールドモデルに関する議論は、ユビキタスコンピューティング研究に関するマークワイザーの論文 [30] が発表された 1990 年の当初から盛んにおこなわれてきた [1, 3]. ワールドモデルに関する最新のアプローチであるデジタルツインは、2003 年にマイケルグリーンブスによって提案された後 [8], 様々な文献で新たなデジタルツインの定義が発表されてきている [20].

また、NASA は、デジタルツインを「利用可能な最良の物理モデル、センサーの更新、および飛行中のツインの寿命を反映するフリート履歴、車両またはシステムの統合されたマルチフィジックス、マルチスケール、確率的シミュレーション」などと定義している [25].

デジタルツインは、以下の 3 つの主要なカテゴリに分類される。最初のカテゴリはデータと仮想世界を利用してシステムのメンテナンスと運用計画を検討するものである。2 番目のカテゴリはさまざまなデータを組み合わせて、仮想世界のシステムをより広い視点からミラーリングするものである。最後のカテゴリは、シミュレーションを通じて設計の時点で製品を調査し、より良い意思決定に使用するものである [9]. すべてのカテゴリで最も重要なのは、現実世界のものをデータ化してモデルとして利用可能とすることである。

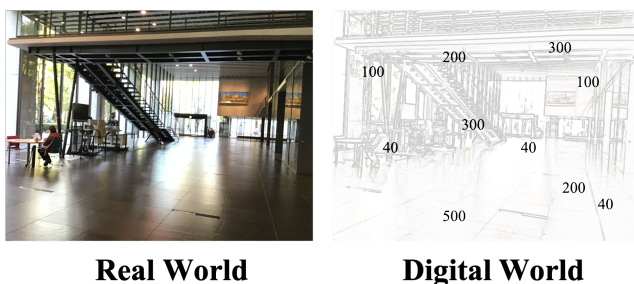


図 1 デジタルツイン
 Figure 1 Digital Twin.

デジタルツインでは、図 1 に示すように、右に示す現実世界内の様々なものを、左に示す仮想世界内のデータ化された現実世界のもののレプリカに変換することが最も重要なポイントになる。過去のアプローチにおける 1 つの典型的な例は、仮想ヘルシンキプロジェクトである [34]. 仮想ヘルシンキプロジェクトでは、本物のヘルシンキ（現実世界のレプリカ）の正確なレプリカ（デジタル化された仮想世界内のレプリカ）が仮想世界内に構築されている。デジタル化されたレプリカは、本物のレプリカから取得されたデータによってモデル化された仮想の建物、仮想の街路、仮想の店などのさまざまな仮想オブジェクトで構成される。仮想オブジェクトは、現実世界のミラーワールドであるデジタル化されたレプリカを表す仮想世界を視覚化するため

に使用できる。また、デジタル化されたレプリカを使用して、取得されたデータを通じて現実世界のさまざまな側面を予測することが可能となる。このアプローチは、将来の革新的なサービスを開発するためのさまざまな有望な機会を提供するインフラストラクチャになる。また、仮想世界内のデジタル化されたレプリカは、仮想世界で目に見えない情報を提示するためにも使用される。

デジタル化されたレプリカを使用することにより、デジタルツインを使用する範囲を広げる機会が増大する。従来のアプローチでは、実際のレプリカの正確なモデルがデジタルツインを設計するための最も重要な要素となる [4]. もちろん、拡張現実技術を紹介して実際のレプリカを拡張するために調査するいくつかの研究があるが、拡張のほとんどは、現実世界に目に見えない補足情報を重ねることのみ焦点を当てている。

3. 仮想／再構築化ツインモデル

従来のデジタルツインを超えた有望な方向性の 1 つは、デジタル化されたレプリカをリフレーミングして具現化することである。デジタル化されたレプリカをリフレーミングすることにより、現実のレプリカの役割を変え、人々の行動や思考に影響を与えることが可能となる。本節では、デジタル化されたレプリカをリフレーミングするために仮想／再構築化ツインモデルが提供する 2 つのパターン群を示す。仮想／再構築化ツインモデルは、現実のレプリカをリフレーミングすることによって革新的なサービスを構築するための概念モデルとなる。

3.1 モデルの概要

図 2 は仮想／再構築化ツインモデルの概要を示している。左側のオレンジの丸は実世界に存在する様々なものを意味している。これは、人工的なものだけではなく、自然に存在するものも含まれる。これらのものに関する情報を取得することにより、左側の仮想世界にデジタル化されたレプリカが生成される。ここでの仮想世界とは計算機内でデータとして表現されることである。

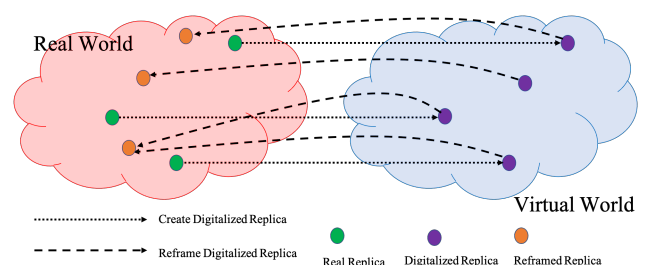


図 2 仮想／再構築化ツインモデルの概要
 Figure 2 An Overview of Virtualizing/Reframing Twin Model.

従来のデジタルツインでは、デジタル化されたレプリカを作り、そのレプリカを利用してツイン化されたものの将

来の状態を予測することが一般的である。また、ユビキタスコンピューティング研究では、デジタル化されたレプリカの状態をサービスが取得して状況依存のサービスを提供したり、仮想ヘルシンキプロジェクトのように3Dグラフィックスにより表現される仮想世界として遠隔のユーザに見せることもおこなわれている。しかし、仮想/再構築ツインモデルでは、仮想化により作られたデジタルレプリカをリフレームすることにより、現実世界に再構築レプリカとして具体化することが大きな違いである。ここで重要な点は、現実のレプリカと再構築レプリカはどちらも現実世界に存在するが、独立したものとして表現されることである。

3.2 仮想化パターン

本節では、現実世界の現実世界レプリカから仮想世界のデジタル化レプリカを作り出すための4つのパターンを説明する。

1つ目のパターンであるデータ化オペレータは、現実世界をデータ化するための最も基本的なオペレータである。典型的な例は、街の経路における様々な情報をデータ化したり [23]、各個人の健康状況をデータ化することである [28]。

2つ目のパターンである抽象化オペレータは実世界に存在するもののモデルを作るためのオペレータである。例えば、気象モデルを作ったり [6]、集合的人々の視点をモデル化したり [16]、仕事をモデル化したり [21]など、デジタル化した様々なサービスを作る上での基本的な考え方になる。モデル化を行うことにより、実世界の様々なプロセスを自動化したり、データ化オペレータと組み合わせて過去のデータ化した状況を用いて将来の状況を予測するなど可能とする。

3つ目のパターンである分割化オペレータは、モデルとして作られたデジタル化レプリカの機能を分割して利用可能とするオペレータである。例えば、Sentient Artefact [13]では、各日常な人工物の持つ様々な機能を分割して情報サービスからアクセスすることを可能としている。また、HAViは情報家電向けの標準プラットフォームであるが [17]、家電機器の複数の機能を分割し、それらをアクセスするための標準APIを提供している。

最後のパターンである複合化オペレータは、分割化した機能を統合して1つの機能として利用可能とするためのオペレータである。これにより、様々な機能を統合した自動化が可能となる。例えば、FedNet [12, 13]では、日常の人工物に含まれる機能を統合して1つのサービスとして定義することを可能としている。

3.3 再構築化パターン

再構築化パターンは、デジタルレプリカを現実世界に視覚化する場合に用いる。例えば、データ化オペレータにより

取得されたデータを視覚化する場合は、元の実世界レプリカの存在と別に実世界に具現化する必要がある。また、複合化された機能を1つの機能として見せるためにはそれぞれ特有のフォームとして表現する必要があるかもしれない。デジタル技術は、ディスプレイ技術、プロジェクション技術、ロボット御術などの進歩に伴い、現実世界の様々な状況を現実世界を改変して見せることを可能としてきている。本節では、再構築化のための4つのパターンを説明する。

1つ目のパターンは変形化フォームである。柔軟に変形するロボティクスデバイスや複数のものが動的に組み、複合化機能を提供したりすることが可能となる。例えば、Line Form [19]は、線状の変形可能なデバイスであり、様々な情報を表現したり、触覚フィードバックを与えたり、様々な物に変形したりすることが可能である。また、Mobility as a Service [7]では、複数のトラックを組み合わせて1つの輸送機械として扱えるようにしたり、その組み合わせを状況に応じて柔軟に変更したりすることを可能としている。変形化フォームは、データ化されたデジタル化レプリカや機能複合化されたデジタルレプリカを再構築化レプリカとして扱う場合に有用になる。

2つ目のパターンは具現化フォームである。具現化フォームは現実には見えないものを扱うためのパターンである。具現化フォームは大きく分けて2つのカテゴリが存在し、1つ目は実際に存在しないものを現実世界に投影するケース [24, 27]、もう1つは、実世界に存在するが明示的に見えないものをジェスチャや音声で操作するためのケースである [29]。

3つ目のパターンは層状化フォームである。このパターンは初期の拡張現実感サービスにおいて広く用いられてきた [2]。ハンドヘルドコンピュータやヘッドマウントディスプレイを用いて現実世界に関する情報をスーパインポーズして視覚化する。また、視覚化だけではなく、音を用いて現実世界の情報を表現することも可能であり、Music Sonar [11]では、ユーザの周辺にある物への距離をアンビエントな音楽により表現している。

最後のパターンは埋込み化フォームである。現実世界の情報を現実世界に存在するものにより表現する。例えば、イマーシブに仮想世界を現実世界に投影したり [35]、アンビエントディスプレイを用いた情報提示 [10, 31, 32]が一般的に用いられている。

4. 仮想/再構築化ツインモデルの応用例

本節では、前節で提案した仮想/再構築化ツインモデルを用いて2つの既存のサービスの分析をおこなう。1つ目は、Google Map [33]であり、2つ目はCollectiveEyes [15]である。Google MapはGoogle社が開発した地図、地域検索デジタルプラットフォームである。地図は現実世界のモデルであり、そのモデルの上で様々なサービスを利用する

ことが可能である。CollectiveEyes は、世界中の人々が現在見ている視点を集め、それを様々なサービスに利用可能とするデジタルプラットフォームである。

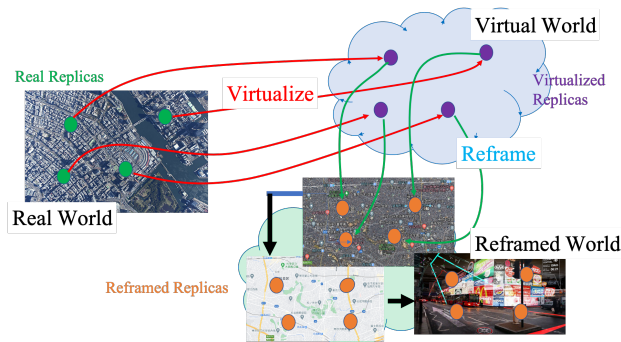


図 3 Google Map を用いた応用例

Figure 3 An Example using Google Map

Google Map では、抽象化オペレータを用いて現実世界をデジタルレプリカである地図として表現している(図 3)。また、現実世界の商店やレストランの情報をデータ化オペレータにより取得して、地図上のデジタル化レプリカの様々な情報として扱うことを可能とする。また、分割化オペレータを利用して、地図上のナビゲーションを分離して、様々なサービスと統合した新しいサービスとして利用することを可能としている。現状では、Google Map は 2 つの地点間の最短経路の検索しか扱えないが、Happy Map [23] のように実世界の経路上の風景やノイズ量をデータ化することより、静かな経路やきれいな経路の探索も扱えるようになる。

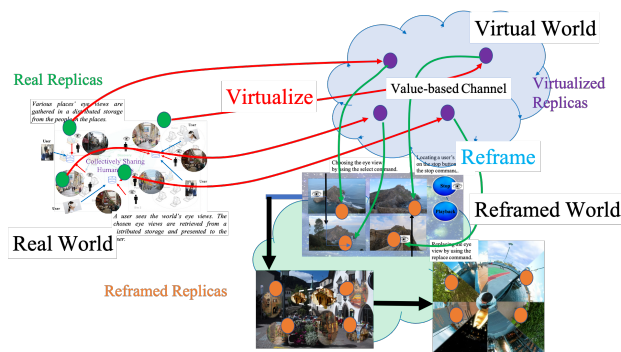


図 4 CollectiveEyes を用いた応用例

Figure 4 An Example using CollectiveEyes

Google Map は再構築化レプリカを作るためには主に層状化フォームを利用している。仮想化した地図上やカメラで取得した実世界ビュー上に様々な情報をスーパインポーズして表示している。新たな可能性としては、変形化フォームを用いて立体地図を表示することにより、高度差のような情報もより容易に表現可能となる。さらに、埋込み化フォームを用いて、層状化フォームを用いて表示していた情報をよりアンビエントに表示することも可能である。特に、拡張現実感を用いた情報の表示は歩行中などの利用時に危険性を増大するので、実世界へのアンビエントな情報の表

示は興味深い拡張であると考えられる。

CollectiveEyes では図 4 に示すように、様々な人々の視点をリアルレプリカと考え、抽象化オペレータを用いて抽象化して分散ストレージに蓄えることでデジタルレプリカを作成している。人間の機能の一部を視覚や聴覚に分離して共有可能なものとして扱うことは、分割化オペレータを用いた仮想化と考えることができる。また、[16]で述べているように、人間の視点の機能を Citizen Science with Dancing と組み合わせてソーシャル視聴を可能とするのは、複合化オペレータを利用した仮想化と考えることができる。

CollectiveEyes は複数視点を再構築化するために層状化フォームを利用している。現在ユーザが見ている現実世界の視点上に様々な視点をスーパインポーズして表示する。他人の視点を見ている最中に、現在の自分の視点も確認できると便利である。そのために、埋込みフォームを用いて、現在の視点の一部として現在の視点の状況を示すことが有望である。例えば、Music Sonar で用いた手法を用いて近くのものとの距離をアンビエントな音楽により表現するのは 1 つのアプローチである。

5. 議論と今後の課題

デジタルレプリカの再構築化は本論文で述べた以外にも様々な可能性が考えられる。例えば、[18]で提案されている Ambient Persuasive Mirrors は、現実世界の様々な出来事をユーザの行動変遷を促すために、より視覚的にわかりやすい形に再構築して表示している。再構築化は現実世界の意味を改変して人々の行動を誘導するための有効な手段であると考えられる。また、変形化フォームは、実世界における自動化プロセスを状況に応じて変化させるための基本的な考え方を提供する。従来のデジタルツインでは、現実のデータをどう利用するかしかなかったが、仮想/再構築化ツインモデルを用いることにより、デジタルツインをどうユーザに価値を提供するサービスとして提供するかまでを考慮することが容易になる。

今後は、再構築化の他の方法の検討を進める。例えば、複数の LED を搭載したドローンを群れとして制御することにより、全体を空間上のディスプレイとして利用することが可能となりつつある [22]。また、バイオやナノテクノロジーを用いて、様々な生物を情報表現するために利用可能となるかもしれない [5]。

6. おわりに

本論文では、デジタルツインモデルを拡張した仮想/再構築化ツインモデルを提案した。提案モデルは現実世界内の実世界レプリカから仮想世界内のデジタルレプリカを作るためのパターンである 4 つのオペレータパターンと仮想世界内のデジタルレプリカから再構築レプリカを作るためのパターンである 4 つのフォームパターンから構成されている。

また、本論文では、提案モデルを用いて既存のデジタルサービスを分析することで、新たな可能性を示唆することにより仮想/再構成化ツインモデルの有用性を示した。

参考文献

- [1] Mike Addlesee, Rupert W. Curwen, Steve Hodges, Joseph Newman, Pete Steggles, Andy Ward, Andy Hopper, Implementing a Sentient Computing System. *IEEE Computer*, Vol.34, No.8, pp.50-56. 2001.
- [2] Mark Billinghurst, Adrian Clark, and Gun Lee, A Survey of Augmented Reality, *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, Vol. 8, No. 2-3, pp.73-272, 2014, DOI: 10.1561/11000000049
- [3] Anind K. Dey, Gregory D. Abowd and Daniel Salber, A Conceptual Framework and a Toolkit for Supporting the Rapid Prototyping of Context-Aware Applications, *Human-Computer Interaction*, Vol.16, No.2-4, pp.97-166. 2001.
- [4] Maryam Farsi, Alireza Daneshkhah, Amin Hosseinian-Far, Hamid Jahankhani. *Digital Twin Technologies and Smart Cities*, Springer, 2020.
- [5] Laura M. Ferrari, Usein Ismailov, Jean-Michel Badier, Francesco Greco and Esma Ismailova, Conducting polymer tattoo electrodes in clinical electro- and magneto-encephalography, *npj Flex Electron* Vol.4, Article 4, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41528-020-0067-z>
- [6] Jaroslav Frnda, Marek Durica, Jan Nedoma, Stanislav Zabka, Radek Martinek and Michal Kostelansky, A Weather Forecast Model Accuracy Analysis and ECMWF Enhancement Proposal by Neural Network, *Sensors* Vol.19, No.23, Paper:5144, 2019.
- [7] Warwick Goodall, Tiffany Dovey Fishman, Justine Bornstein, and Brett Bonthron, The rise of mobility as a service, *Deloitte Review*, Issue 17, 2017
- [8] Michael Grieves, Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication, White paper, pp. 1–7, Florida Institute of Technology, 2014.
- [9] Michael Grieves, John Vickers, Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen FJ., Flumerfelt S., Alves A. (eds) *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer, Cham. 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- [10] Lars Hallnäs and Johan Redström. Slow Technology – Designing for Reflection. *Personal and Ubiquitous Computing*, Vol.5, No.3, pp.201–212. 2001. DOI:<https://doi.org/10.1007/PL00000019>
- [11] Kohki Ikeuchi, Mohammed AlSada, and Tatsuo Nakajima. Providing ambient information as comfortable sound for reducing cognitive overload. In *Proceedings of the 12th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE '15)*. Article 29, pp.1–5. 2015. DOI:<https://doi.org/10.1145/2832932.2832985>
- [12] Fahim Kawsar, Kaori Fujinami, and Tatsuo Nakajima. Exploiting passive advantages of sentient artefacts. In *Proceedings of the Third international conference on Ubiquitous Computing Systems (UCS'06)*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp.270–285. 2006.
- [13] Fahim Kawsar, Tatsuo Nakajima, and Kaori Fujinami. Deploy spontaneously: supporting end-users in building and enhancing a smart home. In *Proceedings of the 10th international conference on Ubiquitous computing*. 2008.
- [14] Risa Kimura, Tatsuo Nakajima. Digitally Enhancing Society Through Structuralism: Virtualizing Collective Human Eyesight and Hearing Capabilities as a Case Study. In: Streitz N., Konomi S. (eds) *Distributed, Ambient and Pervasive Interactions*. HCII 2020. *Lecture Notes in Computer Science*, vol 12203. Springer, Cham. 2020.
- [15] Risa Kimura, Tatsuo Nakajima. Collectively Sharing People’s Visual and Auditory Capabilities: Exploring Opportunities and Pitfalls. *SN Computer Science*, Vol.1, No.5, 298:1-298:24, Springer Nature. 2020, <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00313-w>
- [16] Risa Kimura, Keien Jiang, Di Zhang, Tatsuo Nakajima, Society of “Citizen Science through Dancing”. In: Novais P., Vercelli G., Larriba-Pey J.L., Herrera F., Chamoso P. (eds) *Ambient Intelligence – Software and Applications*. ISAmI 2020. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1239. Springer, Cham. 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58356-9_2
- [17] Rodger Lea, Simon Gibbs, Ravi Gauba, Ram Balaraman, Havi: Example by Example : Java Programming for Home Entertainment Devices, Prentice Hall, 2001.
- [18] Tatsuo Nakajima, Vili Lehdonvirta, Designing motivation using persuasive ambient mirrors. *Personal and Ubiquitous Computing*, Vol.17, pp.107–126, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00779-011-0469-y>
- [19] Ken Nakagaki, Sean Follmer, Artem Demetyev, Joseph A. Paradiso, Hiroshi Ishii, Designing Line-Based Shape-Changing Interfaces, *IEEE Pervasive Computing*, vol. 16, no. 4, pp. 36-46, October-December 2017.
- [20] Elisa Negri, Luca Fumagalli, and Marco Macchi, “A review of the roles of digital twin in cps-based production systems,” 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 939 – 948, 2017.
- [21] Artem Polyvyanyy, Sergey Smirnov, Mathias Weske, Business Process Model Abstraction. In: vom Brocke J., Rosemann M. (eds) *Handbook on Business Process Management*. Springer. 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45100-3_7
- [22] James A. Preiss, Wolfgang Honig, Gaurav S. Sukhatme, and Nora Ayanian, CrazySwarm: A Large Nano-Quadcopter Swarm, In *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2017
- [23] Daniele Quercia, Rossano Schifanella, and Luca Maria Aiello. The shortest path to happiness: recommending beautiful, quiet, and happy routes in the city. In *Proceedings of the 25th ACM conference on Hypertext and social media (HT '14)*, pp.116–125. 2014. DOI:<https://doi.org/10.1145/2631775.2631799>
- [24] Maulidhea Sakina Rahmi, Nandang Rahmat and Amaliatun Saleh, POSTHUMAN IN JAPANESE POPULAR CULTURE: VIRTUAL IDOL HATSUNE MIKU, In *Proceedings of the 1st Annual International Conference on Language and Literature*, Fakultas Sastra, UISU, Medan, Indonesia. 2018.
- [25] Daniel R. A. Schallmo, Christopher A. Williams, *Digital Transformation Now! Guiding the Successful Digitalization of Your Business Model*, Springer, 2018.
- [26] Mike Shafto, Mike Conroy, Rich Doyle, Ed Glaessgen, Chris Kemp, Jaqueline Lemoigne, and Lui Wang, *Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap*, National Aeronautics and Space Administration, 2010.
- [27] Maximilian Speicher, Brian D. Hall, and Michael Nebeling. What is Mixed Reality? In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '19)*. Paper 537, pp.1–15. 2019. DOI:<https://doi.org/10.1145/3290605.3300767>
- [28] Melanie Swan, *The Quantified Self: Fundamental Disruption in Big Data Science and Biological Discovery*, *Big Data*, Vol.1, No.2, pp.85-99, 2013.
- [29] Eiji Tokunaga, Hiroaki Kimura, Nobuyuki Kobayashi, and Tatsuo Nakajima. Virtual tangible widgets: seamless universal

- interaction with personal sensing devices. In Proceedings of the 7th international conference on Multimodal interfaces (ICMI '05). pp.325–332. 2005.
DOI:<https://doi.org/10.1145/1088463.1088518>
- [30] Mark Weiser, The Computer for the 21st Century, Scientific American Vol.265, No.3, pp.94-104, 1991
- [31] Mark Weiser and John Seely Brown, Designing Calm Technology, 1995. <https://calmtech.com/papers/designing-calm-technology.html> (Accessed 2021 February 25)
- [32] Craig Wisneski, Hiroshi Ishii, Andrew Dahley, Matt Gorbet, Scott Brave, Brygg Ullmer, Paul Yarin, Ambient Displays: Turning Architectural Space into an Interface between People and Digital Information. Cooperative Buildings: Integrating Information, Organization, and Architecture. CoBuild 1998. LNCS, vol 1370. Springer. 1998.
- [33] Google Map, <https://www.google.co.jp/maps/> (Accessed March 1 2021)
- [34] Virtual Helsinki, <https://www.virtualhelsinki.fi/> (Accessed March 1 2021)
- [35] teamLab Borderless, <https://borderless.teamlab.art/> (Accessed March 1 2021)