

Intelligenza artificiale per l'analisi delle nuvole di punti per il patrimonio culturale

Marina Paolanti^{1,*}, Roberto Pierdicca^{2,**}, Francesca Matrone³, Benedetta Giovanola¹,
Simona Tiribelli¹, Andrea Maria Lingua³ and Emanuele Frontoni¹

¹Department of Political Sciences, Communication and International Relations, University of Macerata, Via Don Minzoni 22/A, 62100 Macerata, Italy

²Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura (DICEA), Università Politecnica delle Marche, Via Brecce Bianche, 12, 60131, Ancona, Italy

³Politecnico di Torino, Department of Environment, Land and Infrastructure Engineering (DIATI), 10129 Torino, Italy

Abstract

Nel settore del Digital Cultural Heritage (DCH), la sempre maggiore disponibilità di dati tridimensionali, derivanti da piattaforme LiDAR (Light Detection And Ranging), MMS (Mobile Mapping Systems) o UAV (Unmanned Aerial Vehicles), offre l'opportunità di generare rapidamente scene 3D dettagliate a supporto delle attività di conservazione, restauro, salvaguardia e manutenzione del patrimonio edilizio. L'Historical Building Information Modeling (HBIM) si occupa della gestione di questi molteplici tipi di dati sul patrimonio che permettono di arricchire la rappresentazione geometrica del bene, creando così un raccoglimento di dati informativi complete. Raggiungere questo risultato non è banale, poiché i modelli HBIM sono generalmente basati su processi scan-to-BIM che consentono di generare modelli 3D parametrici a partire dalle nuvole di punti. Questi processi, sebbene siano molto affidabili in quanto eseguiti manualmente da esperti del settore, introducono due ostacoli: in primo luogo, richiedono molto tempo e poi si basano su una grande quantità di dati derivati da un numero incalcolabile di informazioni per descrivere un oggetto parametrico. L'uso di tecniche di intelligenza artificiale (AI) per il riconoscimento automatico di elementi architettonici da nuvole di punti può quindi fornire un valido supporto per accelerare questi processi. Inoltre, la segmentazione semantica dei dati 3D del patrimonio culturale aiuterebbe la comunità a comprendere e analizzare meglio i digital twins, a facilitare le operazioni di conservazione e a sostenere molte altre attività legate a questo settore. Inoltre, abbiamo iniziato a vagliare gli aspetti specificamente etici. Abbiamo considerato la fairness come uno dei valori più importanti nel dibattito su Etica e Intelligenza Artificiale (IA) e abbiamo iniziato a sviluppare un quadro etico specifico per il dominio CH.

Keywords

Nuvole di Punti, Segmentazione Semantica, Framework Etico, Generazione automatica

1. Introduction

Nel dominio del Digital Cultural Heritage (DCH), la generazione di nuvole di punti 3D è oggi il modo più efficiente per gestire i beni culturali. Essendo una metodologia consolidata, la rappresentazione di beni culturali attraverso dati 3D è una tecnologia all'avanguardia per svolgere diversi compiti: l'analisi morfologica, la degradazione delle mappe o l'arricchimento dei dati sono solo alcuni

esempi di possibili modi per sfruttare questa ricca rappresentazione virtuale informativa. La gestione delle informazioni DCH è fondamentale per una migliore comprensione dei dati del patrimonio e per lo sviluppo di strategie di conservazione adeguate. Una strategia efficiente di gestione delle informazioni deve prendere in considerazione tre concetti principali: la segmentazione, l'organizzazione delle relazioni gerarchiche e l'arricchimento semantico [1]. La scansione laser terrestre (TLS) e la fotogrammetria digitale consentono di generare grandi quantità di scene 3D dettagliate, con informazioni geometriche che dipendono dal metodo utilizzato. Inoltre, lo sviluppo negli ultimi anni di tecnologie come il Mobile Mapping System (MMS) sta contribuendo alla massiccia documentazione metrica 3D del patrimonio edilizio. Pertanto, la gestione, l'elaborazione e l'interpretazione delle nuvole di punti sta acquisendo importanza nel campo della geomatica e della rappresentazione digitale. Queste strutture geometriche stanno diventando progressivamente obbligatorie non solo per la creazione di esperienze multimediali, ma anche (e soprattutto) per supportare il processo di modellazione 3D, dove ultimamente iniziano a essere impiegate anche le reti neurali. Contempo-

Ital-IA 2023: 3rd National Conference on Artificial Intelligence, organized by CINI, May 29–31, 2023, Pisa, Italy

*Corresponding author.

✉ marina.paolanti@unimc.it (M. Paolanti);
r.pierdicca@staff.univpm.it (R. Pierdicca);
francesca.matrone@polito.it (F. Matrone);
benedetta.giovanola@unimc.it (B. Giovanola);
simona.tiribelli@unimc.it (S. Tiribelli); andrea.lingua@polito.it
(A. M. Lingua); emanuele.frontoni@unimc.it (E. Frontoni)
ID 0000-0002-5523-7174 (M. Paolanti); 0000-0002-9160-834X
(R. Pierdicca); 0000-0002-9160-1674 (F. Matrone);
0000-0002-8429-0871 (B. Giovanola); 0000-0003-4101-5914
(S. Tiribelli); 0000-0002-5930-2711 (A. M. Lingua);
0000-0002-8893-9244 (E. Frontoni)

© 2022 Copyright for this paper by its authors. Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).
CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org)

raneamente, le recenti tendenze della ricerca nel campo dell'HBIM (Historical Building Information Modeling) mirano a gestire molteplici e diversi dati del patrimonio architettonico, affrontando il problema della trasformazione dei modelli 3D da una rappresentazione geometrica a un raccoglitore di dati arricchiti e informativi. Raggiungere tale risultato non è banale, poiché l'HBIM è generalmente basato su processi scan-to-BIM che consentono di generare un modello 3D parametrico a partire da nuvole di punti; questi processi, sebbene molto affidabili in quanto realizzati manualmente da esperti del settore, presentano due svantaggi degni di nota: in primo luogo, sono molto dispendiosi in termini di tempo e, in secondo luogo, sprecano una quantità innumerevole di dati, dato che una scansione 3D (sia basata su TLS che su fotogrammetria a distanza ravvicinata), contiene molte più informazioni di quelle necessarie per descrivere un oggetto parametrico. La letteratura dimostra che, fino ad oggi, i metodi tradizionali applicati al campo della DCH fanno ancora largo uso di operazioni manuali per catturare l'immobile dalle nuvole di punti. Lo sviluppo di framework di Deep Learning (DL) per le nuvole di punti, come Point-Net/Pointnet++ [2], [3] hanno aperto strade più efficaci ed efficienti per la gestione dei dati 3D [4].

In questo contributo saranno descritti gli approcci utilizzati dal nostro gruppo di ricerca in questo settore concentrandosi principalmente sui seguenti aspetti: Dataset Beni Culturali di nuvole di punti [5], Architettura Deep Learning per nuvole di punti per il patrimonio culturale [6], Framework di explainability [7] e Framework Etico [8].

2. ArCH Dataset

Nello stato dell'arte, la maggior parte dei dataset attuali raccoglie dati da ambienti urbani, con scansioni composte da circa 100 K punti, e ad oggi non erano ancora stati pubblicati dataset incentrati su beni culturali con un adeguato livello di dettaglio. Il dataset da noi proposto, denominato ArCH (Architectural Cultural Heritage)¹, è composto da 11 scene etichettate, derivate dall'unione di più scansioni singole o dall'integrazione di queste ultime con rilievi fotogrammetrici.

Le scene coinvolte sono sia interne che esterne, con chiese, cappelle, chiostri, portici e arcate coperti da una varietà di volte e sostenuti da molti tipi diversi di colonne. Appartengono a diversi periodi storici e a diversi stili, al fine di rendere l'insieme dei dati il meno possibile uniforme e omogeneo (nella ripetizione degli elementi architettonici) e i risultati il più possibile generali.

Il dataset è composto da 17 nuvole di punti annotate e da altre 10 non annotate, queste ultime possono essere etichettate dagli utenti e aggiunte al dataset principale.

¹<http://archdataset.polito.it>

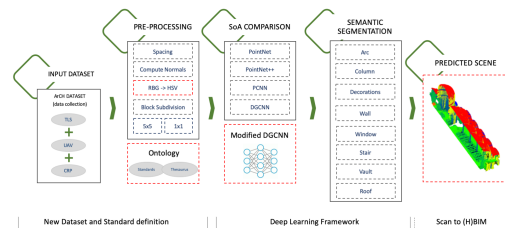


Figure 1: DL Framework for Point Cloud Semantic Segmentation.

Molte delle scene incluse nel benchmark ArCH fanno parte (o sono candidate) alla Lista del Patrimonio Mondiale dell'UNESCO (WHL):

- la cappella della Cattedrale di Strasburgo all'interno della Grande Île, iscritta nel 1988;
- l'aula del Castello del Valentino (VAL) inserita nelle "Residenze della Casa Reale di Savoia" dal 1997;
- il Sacro Monte di Varallo (SMV) e di Ghiffa (SMG) inserito nel più ampio sito dei "Sacri Monti di Piemonte e Lombardia" dal 2003;
- chiesa di St. Pierre situata all'interno della Neustadt iscritta nel 2017;
- i portici di Bologna.

3. Deep Learning per la segmentazione semantica di nuvole di punti del patrimonio culturale

Abbiamo proposto un framework DL per la segmentazione delle nuvole di punti, ispirato al lavoro presentato in [9]. Invece di impiegare singoli punti come Point-Net citeqi2017pointnet, l'approccio proposto in citewang2019dynamic sfrutta le strutture geometriche locali costruendo un grafo di vicinato locale e applicando operazioni simili alla convoluzione sui bordi che collegano coppie di punti vicini. Questa rete è stata migliorata con l'aggiunta di caratteristiche rilevanti come le normali e il colore HSV. Abbiamo dimostrato che la rete raggiunge prestazioni promettenti nel riconoscimento degli elementi [6]. Un'immagine complessiva del framework sviluppato è riportata nella Figura reffig:workflow.

4. BubbleX: an Explainable Deep Learning Framework for Point Cloud Classification

Per migliorare il framework DL per le nuvole di punti, abbiamo proposto BubbleX, un nuovo framework di fusione multimodale per l'apprendimento delle caratteristiche dei punti 3D. Il framework BubbleX è composto da due fasi: Visualization Module and Interpretability Module. In primo luogo, vengono utilizzati t-SNE [10] e UMAP [11], che cercano di preservare la struttura del clustering considerando un vicino locale [12]. Sia t-SNE che UMAP contengono iperparametri che possono avere un impatto sulle strutture visibili all'operatore textcolorred citeyang2020intelligent, citekumari2020shapevis. BubbleX comprende un interpretability module, che descrive come i punti vicini siano coinvolti nell'estrazione delle caratteristiche. Per lo sviluppo di questo modulo, ci siamo ispirati all'approccio Gradient-weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM) [13].

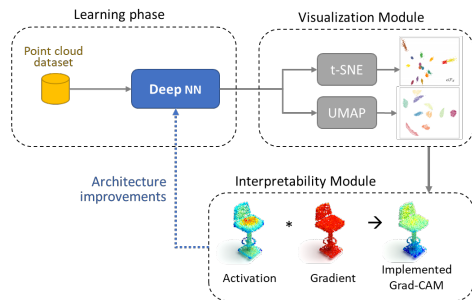


Figure 2: BubbleX workflow. The features extracted from the trained Deep Neural Network serve as input for the Visualization and Interpretability Modules.

5. Design and Assessment of an ethical framework

Nonostante la definizione riconosciuta di principi etici per l'uso responsabile o affidabile dell'IA, mancava un framework specifico di settore che mettesse in luce i rischi e le opportunità etiche per le diverse aree di applicazione. Per questo motivo, nasce l'esigenza di esplorare un'ulteriore prospettiva settoriale che integri la visione orizzontale generalmente adottata [14]. Abbiamo quindi iniziato a colmare queste lacune con la definizione di un framework etico che mettesse in luce le varie sfide e opportunità dell'AI nel CH e fornisca i principi che dovrebbero guidare eticamente la progettazione di questi sistemi per affrontare tali sfide. Il framework è stato sviluppato attraverso una sintesi critica delle principali

linee guida e dei principi dell'etica dell'IA e della loro applicazione al settore della CH, come le Linee guida etiche europee per un'AI affidabile, ICOM Code of Ethics e UNESCO's Recommendations the Ethics of AI [15]. Questo modello è destinato a tutti i professionisti che operano nel campo dei beni culturali, come storici dell'arte, archeologi, manager culturali e curatori di musei, che lavorano con l'AI per la digitalizzazione, la conservazione, la promozione e la sostenibilità del patrimonio culturale. Allo stesso modo, il framework si rivolge a data scientist e programmatori per aiutarli a comprendere le specificità del settore di riferimento quando si applicano soluzioni di intelligenza artificiale in ambito culturale. Questo quadro aiuterà i professionisti a riconoscere i rischi che l'AI può comportare quando viene applicata alla CH, fornendo loro allo stesso tempo una comprensione delle immense opportunità che l'IA può portare al settore, aumentando l'accessibilità, l'inclusione e la conservazione dell'arte e della cultura, portando a una società più giusta e rappresentativa.

Nel febbraio 2020, la Commissione europea ha pubblicato un White Paper che definisce le opzioni politiche per facilitare uno sviluppo sicuro e affidabile dei sistemi di AI [16]. Il White Paper afferma che l'affidabilità è un prerequisito per l'adozione dell'AI. Per essere classificato come affidabile, il sistema di AI deve soddisfare sette requisiti essenziali:

- Human agency and oversight;
- Technical robustness and safety;
- Privacy and data governance;
- Trasparency and explainability;
- Diversity, nondiscrimination and fairness;
- Societal and environmental well being;
- Accountability.

Secondo ICOM Code of Ethics e recommendations of UNESCO, i musei e le istituzioni culturali sono responsabili del patrimonio culturale materiale, immateriale e naturale. Gli organi di governo e coloro ai quali sono affidate le decisioni strategiche sui beni cultural hanno la responsabilità primaria di proteggerla e promuoverla. I musei hanno il dovere di acquisire, conservare e promuovere le loro collezioni per contribuire alla conservazione del patrimonio naturale, culturale e scientifico. Questa missione pubblica include il concetto di "custodia", che comprende la proprietà legittima, la permanenza, la documentazione, l'accessibilità e l'uso responsabile delle collezioni [?]. I musei sono responsabili della cura, dell'accessibilità e dell'interpretazione delle collezioni e della CH. Inoltre, i musei hanno il dovere di sviluppare il loro ruolo educativo e di attrarre un pubblico più ampio dalla comunità, dalla località o dal gruppo che servono [17].

Considerando i principi ICOM Code of Ethics e recommendations of UNESCO, si può affermare che esistono diversi soggetti interessati con responsabilità e interessi diversi che devono essere presi in considerazione quando si progettano, implementano, monitorano e valutano le misure di AI. Per questo motivo, la **shared responsibility** è un principio etico importante. Ciò significa che la responsabilità delle azioni intraprese ricade sulle diverse parti interessate coinvolte nel processo decisionale. Per questo motivo, la responsabilità delle azioni intraprese attraverso l'AI è rivolta tanto ai programmatori quanto agli storici dell'arte o ai manager culturali. Infatti, un prerequisito per l'uso dell'AI in CH è un approccio multidisciplinare che dovrebbe assicurare la responsabilità degli algoritmi da diverse prospettive. Attraverso un dialogo tra storici dell'arte, manager culturali, comunità ed esperti di AI, sarebbe possibile sviluppare tecnologie efficaci per migliorare la conservazione e la promozione della CH in accordo con le sue missioni e la sua storia. Di conseguenza, è fondamentale utilizzare un processo di politica partecipativa sull'IA per co-creare e valutare processi e risultati.

Un altro principio etico particolarmente rilevante è quello della **meaningful participation**², che significa considerare, nell'applicazione di modelli e sistemi di AI, diversi stakeholder e diverse prospettive. Ogni stakeholder deve essere informato, influente e inclusivo. Le soluzioni di AI per CH dovrebbero adottare un approccio umano-centrico e basato sulle comunità [18]. Ciò significa che le politiche di digitalizzazione dovrebbero seguire un approccio dal basso verso l'alto che tenga conto dei bisogni delle comunità e delle persone in base ai valori e all'importanza della CH. Ciò può essere fatto attraverso un approccio di capacity building che si rivolga alle comunità e ne rafforzi la capacità di partecipare in modo significativo [19] a questo processo di trasformazione, fornendo loro strumenti cognitivi e fisici per comprendere e utilizzare le tecnologie in ambienti CH, incoraggiando forme di partecipazione culturale e coinvolgendo le comunità nel processo decisionale.

In secondo luogo, un'applicazione etica dell'IA alla CH presuppone che gli algoritmi di IA siano explainable. Poiché nel patrimonio culturale sono coinvolti diversi tipi di stakeholder, **explainability** e transparency sono aspetti fondamentali per distribuire la responsabilità del processo decisionale tra le parti coinvolte. È importante rendere i modelli di AI più trasparenti e difendere i risultati basati sull'AI con una spiegazione razionale che possa essere compresa dagli utenti non tecnici, compresi il pubblico e le comunità [20], per spiegare in modo comprensibile come e perché è stata intrapresa una particolare azione, senza escludere i non esperti.

²<https://www.unesco.org/en/articles/multistakeholder-group-discusses-ten-building-blocks-towards-creating-inclusive-ai-policies>

Un altro importante principio etico in questo contesto è quello del **accessibility**. È necessario garantire che tutte le istituzioni culturali abbiano accesso a queste tecnologie per migliorare la conservazione e la promozione del patrimonio culturale. I governi nazionali devono quindi impegnarsi per garantire pari opportunità in termini di risorse finanziarie e umane per l'utilizzo dei sistemi di AI. Allo stesso tempo, si devono sempre considerare le esigenze del pubblico di riferimento e, quando si sviluppano soluzioni partecipative virtuali per il consumo di arte, è necessario renderle accessibili e utilizzabili da tutti i tipi di pubblico.

Inoltre, l'AI dovrebbe sostenere la **sustainability** facilitando l'istruzione, l'equità e la giustizia, lo sviluppo urbano, l'accessibilità culturale e il turismo consapevole. La sostenibilità richiede che l'uso dell'IA tenga conto della protezione dell'ambiente, della valorizzazione dell'ecosistema e della biodiversità del pianeta e contribuisca a creare società più giuste ed eque. Per raggiungere questo obiettivo, l'AI dovrebbe essere progettata e gestita con attenzione per ridurre la sua impronta ambientale e migliorare l'efficienza energetica [21]. Inoltre, l'AI dovrebbe essere utilizzata nel campo del CH per rafforzare la resilienza delle comunità ai disastri naturali e ai cambiamenti climatici attraverso sistemi innovativi di ricostruzione e ripristino.

Per affrontare la sfida della descrizione e dell'interpretazione automatica, è importante anche valutare la **reliability** dei dati. Quando si addestrano i modelli, è importante utilizzare dati e materiali descritti da esperti del patrimonio di fiducia per garantire risultati affidabili in termini di descrizione e interpretazione.

L'ultimo, ma non meno importante, elemento costitutivo di questo quadro etico è il principio della **dignity**. La **dignity** è un diritto umano, ma anche un valore fondamentale del CH. Ciò è particolarmente vero per i materiali culturalmente sensibili, come quelli di significato sacro, che, secondo il Codice etico dell'ICOM, devono essere trattati con rispetto e in accordo con gli interessi e le credenze della comunità di riferimento. Per questo motivo, questi aspetti intangibili devono essere presi in considerazione nell'applicazione dell'IA sulla CH, al fine di rispettare, preservare e promuovere la dignità umana.

6. Conclusioni

In questo contributo abbiamo descritto le nostre ricerche per l'analisi automatica di nuvole di punti per il patrimonio culturale. In particolare, nel corso degli ultimi anni abbiamo raccolto un dataset specifico per il settore, rendendolo disponibile alla comunità scientifica, realizzando un framework di deep learning che riuscisse a riconoscere gli oggetti CH in maniera efficace e accurata, abbiamo sviluppato un modello che spiegasse le decisioni

della rete neurale per le nuvole di punti ed infine definito un framework etico che stabilisse le linee guida per lo sviluppo di modelli di deep learning in questo settore.

References

- [1] F. Matrone, E. Grilli, M. Martini, M. Paolanti, R. Pierdicca, F. Remondino, Comparing machine and deep learning methods for large 3d heritage semantic segmentation, *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9 (2020) 535.
- [2] C. R. Qi, L. Yi, H. Su, L. J. Guibas, Pointnet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space, *Advances in neural information processing systems* 30 (2017).
- [3] C. R. Qi, H. Su, K. Mo, L. J. Guibas, Pointnet: Deep learning on point sets for 3d classification and segmentation, in: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2017, pp. 652–660.
- [4] W. Wang, R. Yu, Q. Huang, U. Neumann, Sgpn: Similarity group proposal network for 3d point cloud instance segmentation, in: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2018, pp. 2569–2578.
- [5] F. Matrone, A. Lingua, R. Pierdicca, E. Malinverni, M. Paolanti, E. Grilli, F. Remondino, A. Murtiyoso, T. Landes, A benchmark for large-scale heritage point cloud semantic segmentation, in: *XXIV ISPRS Congress*, volume 43, 2020, pp. 1419–1426.
- [6] R. Pierdicca, M. Paolanti, F. Matrone, M. Martini, C. Morbidoni, E. S. Malinverni, E. Frontoni, A. M. Lingua, Point cloud semantic segmentation using a deep learning framework for cultural heritage, *Remote Sensing* 12 (2020) 1005.
- [7] F. Matrone, M. Paolanti, A. Felicetti, M. Martini, R. Pierdicca, Bubblex: An explainable deep learning framework for point-cloud classification, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 15 (2022) 6571–6587.
- [8] T. S. P. M. F. E. G. B. Pansoni, Sofia, Design of an ethical framework for artificial intelligence in cultural heritage, in: *IEEE Ethics*, 2023.
- [9] Y. Wang, Y. Sun, Z. Liu, S. E. Sarma, M. M. Bronstein, J. M. Solomon, Dynamic graph cnn for learning on point clouds, *Acm Transactions On Graphics (tog)* 38 (2019) 1–12.
- [10] L. Van der Maaten, G. Hinton, Visualizing data using t-sne., *Journal of machine learning research* 9 (2008).
- [11] L. McInnes, J. Healy, J. Melville, Umap: Uniform manifold approximation and projection for dimension reduction, *arXiv preprint arXiv:1802.03426* (2018).
- [12] H. Elhamdadi, S. Canavan, P. Rosen, Affectivetda: Using topological data analysis to improve analysis and explainability in affective computing, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* (2021).
- [13] R. R. Selvaraju, M. Cogswell, A. Das, R. Vedantam, D. Parikh, D. Batra, Grad-cam: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization, in: *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2017, pp. 618–626.
- [14] E. Commission, C. Directorate-General for Communications Networks, Technology, K. Izsak, A. Terrier, S. Kreutzer, T. Strähle, C. Roche, M. Moretto, S. Sorensen, M. Hartung, K. Knaving, M. Johansson, M. Ericsson, D. Tomchak, Opportunities and challenges of artificial intelligence technologies for the cultural and creative sectors, Publications Office of the European Union, 2022. doi:doi/10.2759/144212.
- [15] A. Camara, International council of museums (icom): Code of ethics, in: *Encyclopedia of Global Archaeology*, Springer, 2020, pp. 5868–5872.
- [16] I. G. Cohen, T. Evgeniou, S. Gerke, T. Minssen, The european artificial intelligence strategy: implications and challenges for digital health, *The Lancet Digital Health* 2 (2020) e376–e379.
- [17] A. Camara, International council of museums (icom): Code of ethics (2020) 5868–5872.
- [18] G. Pisoni, N. Díaz-Rodríguez, H. Gijlers, L. Tonolli, Human-centered artificial intelligence for designing accessible cultural heritage, *Applied Sciences* 11 (2021) 870.
- [19] G. Wijesuriya, J. Thompson, S. Court, People centred approaches, *Heritage, Conservation and Communities: Engagement, participation and capacity building* (2016) 34.
- [20] N. Díaz-Rodríguez, G. Pisoni, Accessible cultural heritage through explainable artificial intelligence, in: *Adjunct Publication of the 28th ACM Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization*, 2020, pp. 317–324.
- [21] A. Jobin, M. Ienca, E. Vayena, The global landscape of ai ethics guidelines, *Nature Machine Intelligence* 1 (2019) 389–399.