

Protection suffisante d’objet 3D par déformations géométriques

Khélian Larvet^{1,2} William Puech¹ Jean-Pierre Pedeboy²

¹ LIRMM, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France

² STRATEGIES, Rungis, France

Résumé

Les récents progrès des applications multimédia ont considérablement contribué à la popularité des objets 3D dans divers domaines, avec une fréquence accrue de leur stockage et transmission en ligne. Il devient vital de les sécuriser afin de protéger leur intégrité, leur confidentialité et leur propriété intellectuelle. Dans cet article, nous présentons une nouvelle méthode de protection qui se distingue des méthodes de l’état de l’art basées sur de l’ajout de bruit. Notre approche consiste en l’application de déformations globales réversibles, contrôlées par une clé secrète afin de rendre un objet 3D inintelligible. Les résultats expérimentaux montrent que notre méthode peut s’avérer intéressante pour une protection suffisante bloquant toutes copies numériques ainsi que toutes impressions 3D des objets 3D protégés. Nous présentons des résultats expérimentaux et évaluons la robustesse de notre approche face à des attaques par des utilisateurs.

Mots clefs

Sécurité multimédia, déformations géométriques 3D, sécurité 3D, sécurité visuelle 3D.

1 Introduction

Le développement des objets 3D a révolutionné notre société, offrant une représentation plus intuitive de l’espace et des caractéristiques des objets qui nous entourent. Leur importance ne cesse de croître et leurs applications sont diverses, couvrant des domaines tels que les jeux, les films, l’architecture, la médecine, ainsi que divers secteurs économiques, sociaux et commerciaux [1, 2, 3]. Cette popularité entraîne une augmentation du stockage et de la transmission en ligne des objets 3D, qui contiennent souvent des informations sensibles. Ces informations, telles que des données personnelles ou des secrets commerciaux dans le secteur industriel, deviennent vulnérables aux attaques, et leur divulgation non autorisée entraîne des pertes économiques considérables [4, 5, 6]. Il devient donc crucial de préserver la confidentialité des objets 3D et d’en assurer la sécurité pendant leur stockage et leur transmission.

Il existe principalement deux grandes catégories de méthodes pour protéger les objets 3D, à savoir l’insertion de données cachées et le chiffrement. L’insertion de données cachées consiste à intégrer de manière invisible un message secret dans un objet 3D [7, 8, 9]. Ces approches peuvent

être robustes, notamment pour la protection des droits d’auteur, ou fragiles, afin de garantir l’intégrité des objets 3D.

Les méthodes de chiffrement incluent les méthodes de chiffrement complet et sélectif. Les méthodes de chiffrement complet sécurisent un objet 3D en convertissant intégralement son contenu en un fichier binaire chiffré et inintelligible, garantissant ainsi une confidentialité totale. En revanche, les méthodes de chiffrement sélectif chiffrent uniquement des informations spécifiques des objets 3D [10]. Ces approches permettent de conserver le format original des objets et peuvent être compatibles avec une étape de compression, tout en offrant différents niveaux de sécurité visuelle, ajustés aux besoins spécifiques de l’utilisateur.

De nombreux travaux ont porté sur le chiffrement sélectif des objets 3D. Gschwantner *et al.* proposent un système de protection des objets 3D utilisant des maillages 3D progressifs pour appliquer un chiffrement différent à chaque partie de l’objet 3D [11]. Eluard *et al.* ont introduit le principe de chiffrement préservant la géométrie, avec une méthode de chiffrement basée sur des permutations pseudo-aléatoires des sommets [12]. Dans les travaux de Beugnon *et al.*, les coordonnées (X, Y, Z) des sommets des objets 3D sont converties en format binaire, puis certains bits sont sélectionnés pour être chiffrés, ce qui permet de présenter des niveaux variés de sécurité visuelle [13]. À partir de ce principe, en 2022, Jansen van Rensburg *et al.* ont proposé une méthode de chiffrement hiérarchique permettant de générer plusieurs versions déchiffrées d’un même objet 3D [14]. En 2024, Li *et al.* ont abordé l’adaptabilité limitée de [14] en proposant une méthode de chiffrement prenant en charge un déchiffrement hiérarchique adaptatif [15]. Enfin, Zhao *et al.* ont développé un chiffrement XOR avec des permutations basées sur un système chaotique [16].

Dans cet article, contrairement à l’état de l’art en chiffrement sélectif consistant à protéger les objets 3D principalement par ajout de bruit sur les sommets, nous proposons une nouvelle méthode de protection réversible des objets 3D, basée sur des déformations géométriques. Pour cela, pour chacun des axes X , Y et Z , nous appliquons un redimensionnement pseudo-aléatoire basé sur une clé secrète, sachant que chacun des trois facteurs de redimensionnement appliqués est contraint par les deux autres, cela afin de garantir une protection visuelle suffisante.

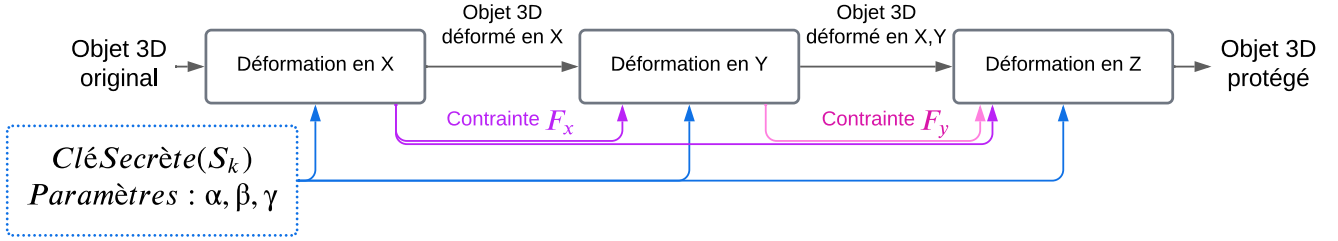


FIGURE 1 – Aperçu général du processus de protection des objets 3D par déformations pour chacun des axes X , Y et Z .

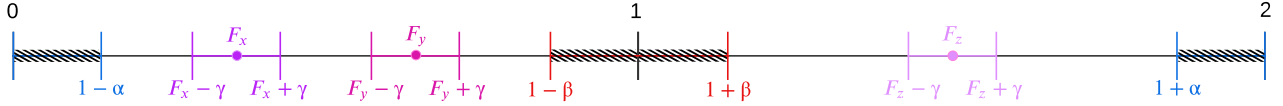


FIGURE 2 – Illustration des contraintes sur la sélection des facteurs de redimensionnement.

2 Méthode de protection d'objet 3D

La méthode que nous proposons repose sur des déformations géométriques obtenues par redimensionnement des axes X , Y et Z . Les facteurs de redimensionnement F_X , F_Y et F_Z sont générés à l'aide d'un générateur pseudo-aléatoire dont la graine est une clé secrète, garantissant ainsi la réversibilité du processus. Bien que la forme générale de l'objet reste accessible, cette méthode offre une protection suffisante de l'objet 3D en déformant suffisamment ses détails pour les protéger. La figure 1 illustre une vue d'ensemble de la méthode proposée. Afin de ne pas se retrouver dans la situation d'une transformation globale qui ne serait qu'un simple agrandissement ou au contraire qu'une simple réduction de la taille de l'objet ($F_X \approx F_Y \approx F_Z$), une fois que le premier redimensionnement suivant un axe est appliqué, des contraintes supplémentaires sont appliquées aux autres facteurs de redimensionnement.

Par conséquent, avec notre approche, les déformations par redimensionnement présentent des cas particuliers qui nécessitent une attention particulière, tels qu'un redimensionnement uniforme ou proche de l'identité. Pour éviter ces déformations qui conservent la plupart des détails de l'objet 3D original, nous proposons un algorithme qui contraint la génération pseudo-aléatoire des facteurs de redimensionnement afin de respecter quatre contraintes spécifiques. Comme illustré en figure 2, nous notons α , le paramètre d'amplitude de la zone aléatoire autour de l'identité, β le paramètre d'amplitude de la zone interdite autour de l'identité, et γ le paramètre d'amplitude de la zone interdite autour d'un facteur de redimensionnement F choisi.

Les contraintes illustrées en figure 2, sont les suivantes :

1. La portée maximale aléatoire autour de l'identité est : $[1 - \alpha; 1 + \alpha]$.
2. La zone interdite autour de l'identité est définie par : $[1 - \beta; 1 + \beta]$, avec $\beta < \alpha$.
3. La zone interdite autour de chaque facteur de redimensionnement F_i , avec $i \in \{X, Y, Z\}$, afin d'évi-

ter des facteurs de redimensionnement trop similaires est : $[F_i - \gamma; F_i + \gamma]$, avec $\gamma < (\alpha - \beta)/2$.

4. Les facteurs de redimensionnement ne peuvent pas tous les trois, soit agrandir, soit réduire la forme de l'objet 3D. Cela implique qu'au moins un facteur de redimensionnement soit supérieur à l'identité et au moins un inférieur à l'identité.

En combinant toutes ces contraintes, les zones possibles pour la sélection des facteurs de redimensionnement sont :

$$[1 - \alpha; 1 - \beta] \cup [1 + \beta; 1 + \alpha] \setminus \bigcup_{F_i \in X, Y, Z} [F_i - \gamma; F_i + \gamma], \quad (1)$$

où F_i est l'ensemble des facteurs de redimensionnement déjà générés. Ces contraintes permettent d'assurer une diversité suffisante dans les redimensionnements tout en évitant les déformations uniformes ou proches de l'identité.

Algorithme 1 : Redimensionnement 3D

- 1: **Input** : Objet 3D original avec n sommets $v_i : O$;
Facteurs de redimensionnement : F_x, F_y et F_z ;
 - 2: **Output** : Objet 3D protégé avec n sommets $v'_i : O'$
 - 3: **for** chaque sommet v_i de O **do**
 - 4: $v'_{i,x} \leftarrow v_{i,x} \times F_x$
 - 5: $v'_{i,y} \leftarrow v_{i,y} \times F_y$
 - 6: $v'_{i,z} \leftarrow v_{i,z} \times F_z$
 - 7: **end for**
 - 8: **return** O'
-

Afin d'appliquer ces redimensionnements suivant chaque axe, nous appliquons l'algorithme de redimensionnement décrit dans l'algorithme 1. A partir d'un objet 3D original O et des facteurs de redimensionnement générés F_X , F_Y et F_Z pseudo-aléatoirement à partir d'une clé secrète, et respectant les contraintes résumés en équation 1, tous les sommets de l'objet original O sont déformés afin de générer un objet 3D protégé O' .

L'objet 3D original peut alors être reconstruit de manière totalement réversible à partir de l'objet 3D protégé O' en appliquant les déformations géométriques inverse. En effet, pour la phase de décodage, à partir de la clé secrète il est possible de générer à nouveau les trois facteurs de redimensionnement F_X , F_Y et F_Z et d'appliquer sur l'objet 3D protégé O' les transformations inverses $\frac{1}{F_X}$, $\frac{1}{F_Y}$ et $\frac{1}{F_Z}$ respectivement sur chacun des trois axes.

3 Résultats

Dans cette section nous présentons et analysons des résultats expérimentaux obtenus avec la méthode de protection d'objets 3D que nous proposons. En section 3.1, nous présentons des résultats sur un ensemble d'objets 3D et mesurons leurs déformations sur la base d'un calcul RMSE. En section 3.2, nous présentons une expérience proposée à des utilisateurs afin d'attaquer par déformation des objets 3D protégés par notre méthode.

3.1 Protection par déformation

Nous utilisons le format 3D PLY avec une précision flottante de 32 bits selon la norme IEEE 754 pour définir les sommets des objets 3D. Les objets 3D peuvent être déformés avec des facteurs de déformation allant jusqu'à 1×10^{-38} . Nous avons mené une expérience en sélectionnant 10 objets 3D^{1,2} et en leur appliquant 5 déformations aléatoires, avec les paramètres : $\alpha = 0.9$, $\beta = 0.25$ et $\gamma = 0.25$. La première ligne du tableau 1 illustre 4 de ces 10 objets.









Objet 3D original O			
			
Objet 3D protégé O'			
			
{1.52, 0.41, 0.13}	{1.26, 0.32, 1.76}	{0.18, 0.74, 1.88}	{1.57, 1.85, 0.17}
RMSE entre l'objet 3D original O et l'objet 3D déformé O'			
1.274	1.003	1.003	0.883
RMSE entre l'objet 3D original O et l'objet 3D reconstruit O''			
7.45×10^{-8}	7.73×10^{-8}	6.11×10^{-8}	4.26×10^{-8}

TABLEAU 1 – Protection d'objets 3D par déformation avec $\alpha = 0.9$, $\beta = 0.25$, $\gamma = 0.25$, sur 4 objets originaux^{1,2} avec différents facteurs de redimensionnement $\{F_X, F_Y, F_Z\}$.

La deuxième ligne du tableau 1 présente ces 4 objets après protection par déformation. Nous observons que, bien que les objets soient déformés, il est encore possible de reconnaître la forme de ces objets, la protection est dite "suffisante". La valeur de la racine de l'erreur quadratique

moyenne (RMSE) entre un objet 3D original et ce même objet 3D protégé est en moyenne égale à 1. Après reconstruction, en moyenne le RMSE entre l'objet reconstruit et l'objet original, est de l'ordre de 10^{-8} , ce qui peut être considéré comme réversible.

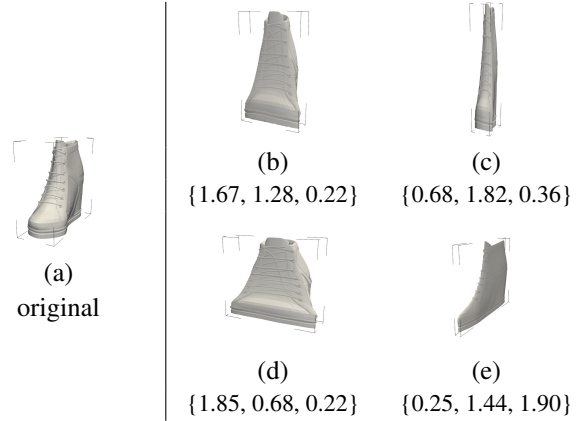


FIGURE 3 – 4 déformations $\{F_X, F_Y, F_Z\}$ de l'objet 3D "Chaussure".

La notion de protection "suffisante" s'appuie sur les travaux de Pommer *et al.* [1] et de Beugnon *et al.* [2, 3] qui définissent la sécurité visuelle d'un objet 3D comme l'accessibilité de cet objet par le système visuel humain (SVH). Trois niveaux de sécurité visuelle ont ainsi été établis pour les objets 3D. Au niveau confidentiel, ni la forme ni le contenu de l'objet 3D ne sont accessibles au SVH. Au niveau suffisant, seule la forme de l'objet 3D est visible, tandis que le contenu reste caché. Enfin, au niveau transparent, la forme et le contenu de l'objet 3D sont accessibles, mais les détails de haute qualité restent protégés et ne peuvent pas être utilisés.

Dans notre cas, notre méthode atteint un niveau de sécurité visuelle suffisant où la forme de l'objet 3D reste accessible, tout en étant suffisamment déformés pour empêcher une utilisation précise, comme par exemple une impression 3D.

3.2 Attaques des objets 3D protégés

Nous avons sollicité 22 participants avec le protocole suivant : chaque utilisateur se voit présenter une déformation choisie aléatoirement pour chacun des 10 objets 3D^{1,2}. Leur objectif est de manipuler l'objet 3D protégé afin d'essayer de retrouver l'objet 3D original à un facteur d'échelle près.

Pour ce faire, nous avons mis en place une interface web permettant de charger un objet 3D et de le manipuler dans l'espace avec des fonctions de déplacement et de rotation. Des curseurs ont été ajoutés pour modifier les facteurs de déformation en chaque axe X , Y et Z de l'objet 3D, comme illustré figure 4.

1. <https://free3d.io>
2. <https://www.artec3d.com/3d-models>

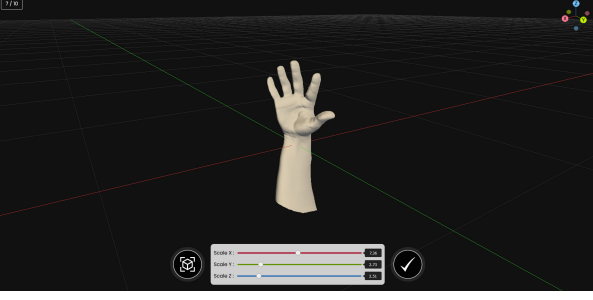


FIGURE 4 – Interface de l'application.

Pour mesurer la correspondance d'un objet 3D reconstruit par un utilisateur par rapport à sa version originale et protégée, nous utilisons les ratios des dimensions. Pour l'objet original O , l'objet protégé O' et l'objet reconstruit par un utilisateur O'' , nous notons les ratios R de la manière suivante :

$$R_{xy} = \frac{x}{y}, \quad R_{xz} = \frac{x}{z}, \quad R_{yz} = \frac{y}{z}. \quad (2)$$

Pour chaque objet, les ratios sont définis comme suit :

$$R_{xy}^O = \frac{O_x}{O_y}, \quad R_{xz}^O = \frac{O_x}{O_z}, \quad R_{yz}^O = \frac{O_y}{O_z}, \quad (3)$$

$$R_{xy}^{O'} = \frac{O'_x}{O'_y}, \quad R_{xz}^{O'} = \frac{O'_x}{O'_z}, \quad R_{yz}^{O'} = \frac{O'_y}{O'_z}, \quad (4)$$

$$R_{xy}^{O''} = \frac{O''_x}{O''_y}, \quad R_{xz}^{O''} = \frac{O''_x}{O''_z}, \quad R_{yz}^{O''} = \frac{O''_y}{O''_z}. \quad (5)$$

Prenons l'exemple du ratio R_{xy} . Lorsque $R_{xy}^{O''} = R_{xy}^O$, nous souhaitons obtenir un score de 1.0, indiquant une correspondance parfaite avec l'objet original, et lorsque $R_{xy}^{O''} = R_{xy}^{O'}$, un score de 0.0, indiquant une correspondance avec l'objet protégé. En utilisant ces conditions, nous définissons la fonction linéaire suivante :

$$S_{xy} = \alpha_{xy} \times R_{xy}^{O''} + \beta_{xy}, \quad (6)$$

avec $R_{xy}^{O''} \in [R_{xy}^O; R_{xy}^{O'}]$. En résolvant pour α_{xy} et β_{xy} , nous obtenons :

$$\alpha_{xy} = \frac{1.0}{R_{xy}^O - R_{xy}^{O'}}, \quad \beta_{xy} = -\frac{R_{xy}^{O'}}{R_{xy}^O - R_{xy}^{O'}}. \quad (7)$$

En substituant ces valeurs, nous obtenons le score :

$$S_{xy} = \frac{R_{xy}^{O''} - R_{xy}^{O'}}{R_{xy}^O - R_{xy}^{O'}}. \quad (8)$$

Les scores pour les autres ratios R_{xz} et R_{yz} sont calculés de la même manière :

$$S_{xz} = \frac{R_{xz}^{O''} - R_{xz}^{O'}}{R_{xz}^O - R_{xz}^{O'}}, \quad S_{yz} = \frac{R_{yz}^{O''} - R_{yz}^{O'}}{R_{yz}^O - R_{yz}^{O'}}. \quad (9)$$

La correspondance globale est la moyenne des trois scores :

$$S = \frac{1}{3} (S_{xy} + S_{xz} + S_{yz}). \quad (10)$$

Objet 3D	Score μ (%)	Score σ (%)
Main	84.04 %	14.27 %
Voiture	92.92 %	4.13 %
Sculpture	91.18 %	6.54 %
Chaussure	67.31 %	30.85 %
Chaise	75.19 %	14.12 %
Chandelier	85.06 %	9.63 %
Dague	80.06 %	23.06 %
Clé	75.71 %	20.58 %
Vis	80.03 %	15.61 %
Fleur	86.52 %	12.80 %
Total	81.81 %	18.49 %

TABLEAU 2 – Score moyen de reconstruction par 22 utilisateurs et écart type des objets 3D.

Lors de la reconstruction d'objets 3D, nous avons observé que les utilisateurs tendent à identifier et à reconstituer les formes probablement circulaires ou sphériques de l'objet original. Nos résultats, illustrés dans le tableau 2, montrent qu'en moyenne sur 22 utilisateurs, les objets 3D ont été reconstruits avec un score moyen de 81,8 % et un écart type de 18,4 %. Notons que, malgré ces scores relativement élevés, les objets attaqués par les utilisateur ne permettent pas d'effectuer un copie numérique ou une impression 3D de qualités. Les objets 3D restent suffisamment protégés par notre méthode.

4 Conclusion

Dans cet article, nous avons introduit une méthode innovante de protection des objets 3D basée sur des déformations géométriques. Contrairement aux techniques traditionnelles d'ajout de bruit, notre approche utilise des redimensionnements contrôlés par un générateur pseudo-aléatoire, garantissant la réversibilité. Les résultats montrent qu'un attaquant peut reconstruire l'objet original avec une précision moyenne de 81,81%, ce qui montre que notre méthode est suffisante pour protéger les objets 3D contre une copie ou une impression 3D illégale par exemple. Cette approche ouvre donc de nouvelles perspectives pour la protection 3D via des déformations géométriques.

À l'avenir, nous avons pour objectif d'explorer de nouvelles déformations géométriques afin d'évaluer leur potentiel de confidentialité. Nous envisageons également d'appliquer des déformations géométriques locales, car nos déformations ont jusqu'à présent été globales. Cette approche pourrait créer de nouveaux effets et élargir les possibilités de protection des objets 3D.

Références

- [1] Andreas Pommer et Andreas Uhl. Application scenarios for selective encryption of visual data. Dans *Multimedia and Security Workshop, ACM Multimedia*, 2002.
- [2] Sebastien Beugnon, William Puech, et Jean-Pierre Pedeboy. From visual confidentiality to transparent format-compliant selective encryption of 3D objects. Dans *2018 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW)*, pages 1–6. IEEE, 2018.
- [3] Sébastien Beugnon, Bianca Jansen van Rensburg, Naima Amalou, William Puech, et Jean-Pierre Pedeboy. A 3D Visual Security (3DVS) score to measure the visual security level of selectively encrypted 3D objects. *Signal Processing : Image Communication*, 108 :116832, 2022.
- [4] Marianna Lezzi, Mariangela Lazoi, et Angelo Corrallo. Cybersecurity for Industry 4.0 in the current literature : A reference framework. *Computers in Industry*, 103 :97–110, 2018.
- [5] Siva Chaitanya Chaduvula, Adam Dachowicz, Mikhail J Atallah, et Jitesh H Panchal. Security in cyber-enabled design and manufacturing : A survey. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 18(4) :040802, 2018.
- [6] Dazhong Wu, David W Rosen, Lihui Wang, et Dirk Schaefer. Cloud-based design and manufacturing : A new paradigm in digital manufacturing and design innovation. *Computer-aided design*, 59 :1–14, 2015.
- [7] Kai Wang, Guillaume Lavoué, Florence Denis, et Atilla Baskurt. A comprehensive survey on three-dimensional mesh watermarking. *IEEE Transactions on Multimedia*, 10(8) :1513–1527, 2008.
- [8] N Medimegh, S Belaid, et N Werghe. A survey of the 3D triangular mesh watermarking techniques. *International Journal of Multimedia*, 1(1) :33–39, 2015.
- [9] Chang-Min Chou et Din-Chang Tseng. Technologies for 3d model watermarking : A survey. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 7 :328–334, 2007.
- [10] Ayoub Massoudi, Frédéric Lefebvre, Christophe De Vleeschouwer, Benoit Macq, et J-J Quisquater. Overview on selective encryption of image and video : challenges and perspectives. *Eurasip Journal on information security*, 2008(1) :179290, 2008.
- [11] Michael Gschwandtner et Andreas Uhl. Protected progressive meshes. Dans *International Symposium on Visual Computing*, pages 35–48. Springer, 2009.
- [12] Marc Éluard, Yves Maetz, Gwenaél Doërr, R Technicolor, et D France. Geometry-preserving encryption for 3D meshes. *Actes de COMPRESSION et REPRÉSENTATION des SIGNAUX AUDIOVISUELS*, pages 7–12, 2013.
- [13] Sebastien Beugnon, William Puech, et Jean-Pierre Pedeboy. From visual confidentiality to transparent format-compliant selective encryption of 3D objects. Dans *2018 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW)*, pages 1–6. IEEE, 2018.
- [14] Bianca Jansen van Rensburg, William Puech, et Jean-Pierre Pedeboy. A format compliant encryption method for 3D objects allowing hierarchical decryption. *IEEE Transactions on Multimedia*, 25 :7196–7207, 2022.
- [15] Shimin Li, Ruoyu Zhao, Qingxiao Guan, Junxin Chen, et Yushu Zhang. A 3D model encryption method supporting adaptive visual effects after decryption. *Advanced Engineering Informatics*, 59 :102319, 2024.
- [16] Ruoyu Zhao, Yushu Zhang, Shimin Li, Wenying Wen, Shuang Yi, et Rushi Lan. 3D mesh encryption with differentiated visual effect and high efficiency based on chaotic system. *Expert Systems with Applications*, 238 :122140, 2024.