



HAL
open science

Incarner un Avatar en Réalité Augmentée : Revue de la Littérature

Adélaïde Genay, Anatole Lécuyer, Martin Hachet

► **To cite this version:**

Adélaïde Genay, Anatole Lécuyer, Martin Hachet. Incarner un Avatar en Réalité Augmentée : Revue de la Littérature. WACAI 2020 - Workshop sur les Affects, Compagnons artificiels et Interactions, CNRS, Université Toulouse Jean Jaurès, Université de Bordeaux, Jun 2020, Saint Pierre d'Oléron, France. <hal-02933477>

HAL Id: hal-02933477

<https://inria.hal.science/hal-02933477v1>

Submitted on 8 Sep 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License

Incarner un Avatar en Réalité Augmentée : Revue de la Littérature

Adélaïde Genay
adelaide.genay@inria.fr
Inria
Bordeaux, France

Anatole Lécuyer
anatole.lecuyer@inria.fr
Inria
Rennes, France

Martin Hachet
martin.hachet@inria.fr
Inria
Bordeaux, France

ABSTRACT

L'objectif de cet article est de passer en revue la littérature ayant pour sujet l'incarnation en réalité augmentée et les systèmes permettant de l'expérimenter. Il commence par préciser ce qu'est un "avatar" dans ce contexte et introduit les principaux concepts de la notion d'incarnation. Il décrit ensuite les travaux de recherche qui ont contribué à mieux la comprendre et à la mettre en place au sein d'un environnement réel. Dans cette partie, les connaissances sur les composantes du sentiment d'incarnation et sur les facteurs techniques qui l'affectent sont exposées ainsi que les technologies et modes de visualisation utilisés pour l'étudier. Pour terminer, cet article résume et discute de ces résultats afin d'offrir des perspectives de recherches.

KEYWORDS

avatars, réalité augmentée, sentiment d'incarnation

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte et motivations

La question de la représentation de l'utilisateur est une composante importante des environnements virtuels. Les *avatars* en constituent une réponse adéquate : définis par Bailenson et Blascovich [5] comme "représentation digitale perceptible dont les comportements sont le reflet d'un être humain particulier", ils nous fournissent une interface avec le virtuel et offrent la possibilité de personnaliser son apparence. L'émergence des communautés en ligne portée par la popularité croissante des jeux-vidéos procure aux avatars un potentiel social important. Rapidement, leur démocratisation est accompagnée de nombreuses interrogations sur leurs impacts psychiques et sociétaux.

La nécessité de comprendre l'incarnation des avatars s'est amplifiée avec le développement de casques de Réalité Virtuelle (RV). Ces derniers permettent de projeter son point de vue dans celui d'un autre corps, ce qui suscite autant l'intérêt de la communauté scientifique que celui des entreprises. En effet, avoir un corps dans un milieu virtuel immersif amplifie le sentiment d'y être "présent" [60] et améliore l'expérience utilisateur. A ce titre, les grands acteurs industriels de la RV se sont mis à développer des solutions de capture de mouvements de haute précision pour produire un comportement plus fidèle de l'avatar [16, 28, 71]. Les avancées technologiques issues des contributions industrielles ont favorisé la mise en place de recherches plus théoriques sur le sentiment d'incarnation, finalement encore peu compris. Ainsi, Kilteni et Slater [32] proposent une définition - amplement utilisée - qui découpe le sentiment d'incarnation en trois sous-composantes : le sens de l'*auto-localisation* (i.e. la connaissance de la position de son

corps), le sens de l'*agentivité* (i.e. l'impression d'être l'auteur des mouvements de son corps) et le sens de la *propriété corporelle* (i.e. l'impression que son corps est à l'origine des sensations ressenties). Complémentaire à cette définition, une littérature étendue soulève de nombreux facteurs d'influence de ces attributs tels que l'apparence de l'avatar [58], la cohérence structurelle [29], les interactions avec l'environnement [2] ou encore les retours sensoriels [18].

L'incarnation d'un avatar en Réalité Augmentée (RA) a de nombreuses applications intéressantes, que ce soit pour les jeux-vidéos, la collaboration à distance, le monde médical ou tout simplement comme moyen d'expression. En RV, il fut montré que la représentation virtuelle utilisée affecte non-seulement la façon dont les autres nous perçoivent, mais aussi la façon dont nous percevons nous-même et notre environnement. Ce phénomène souvent observé en RV est également accompagné d'un changement dans le comportement utilisateur, dénommé *Effet Proteus* [69]. La possibilité (non-étudiée à ce jour) qu'il puisse aussi être généré en RA soulève un grand intérêt pour l'utilisation d'avatars en environnement réel.

Toutefois, la RA reste fondamentalement différente de la RV : elle ne cherche pas à immerger l'utilisateur dans un environnement entièrement synthétique. Au contraire, elle nous maintient dans une réalité physique où des éléments virtuels y sont ancrés. Il est donc difficile de généraliser les connaissances acquises en RV sans vérification. Dès lors, le premier pas pour comprendre la relation entre un utilisateur et son avatar en RA consiste à cerner les mécanismes du sentiment d'incarnation d'un avatar dans un environnement où le réel et le virtuel se mélangent. Cette revue de littérature cherche à contribuer à cet objectif.

1.2 Constitution du corpus

Cet article se concentre sur la question de l'incarnation d'un avatar en RA. Il propose une revue de la littérature prenant en compte à la fois des aspects psychologiques et des aspects technologiques. Elle ne vise pas à être un recueil exhaustif, mais à former un échantillon représentatif du sujet et à en fournir une riche description. Enfin, elle cherche à faire ressortir les aspects non-étudiés de ce phénomène psychologique, de proposer des hypothèses soutenues par des travaux analogues à leur sujet, et de soumettre des propositions de recherche pour les clarifier.

Les articles ont été sélectionnés de manière à offrir plusieurs angles de vue sur le sentiment d'incarnation. Ils ont également été choisis afin d'exposer les différentes techniques et systèmes existants pour le mettre en place. Leur recherche a été principalement menée par l'intermédiaire d'outils comme Google Scholar et Scopus avec des combinaisons de mots-clés tels que *sense of embodiment*, *augmented reality*, *avatar*, *body ownership*, *virtual hand illusion*, *body*

transfer, ou *mixed reality*. Les questions de recherche suivantes ont été utilisées pour guider le choix et l'analyse de la littérature :

- Qu'entend-on par "sentiment d'incarnation" en RA dans la littérature ?
- Comment expérimenter le sentiment d'incarnation en RA ?
- Comment le sentiment d'incarnation est-il connecté à d'autres concepts de la RA ?
- Comment évaluer le sentiment d'incarnation en RA ?
- Quelles différences et ressemblances y a-t-il entre le sentiment d'incarnation en RA et en RV ?

Afin de restreindre la quantité de documents à couvrir, certaines notions ont été écartées en choisissant des définitions précises des concepts étudiés. Par exemple, comme l'indiquent Kilteni et Slater [32], le sentiment d'incarnation est à distinguer de l'incarnation elle-même qui change de sens selon le contexte. Souvent, l'*incarnation* fait référence à la représentation d'une personne ou d'une chose de manière générale. Nous nous intéresserons uniquement au *sentiment d'incarnation* qui correspond à l'ensemble des sensations qui surviennent conjointement au fait d'être à l'intérieur, de posséder et de contrôler un corps [32]. Ainsi, cette définition écarte les travaux tel que ceux de Shapiro *et al.* [59] mettant en œuvre des agents virtuels, contrôlés par une intelligence artificielle. L'étude du *sentiment de présence* d'un avatar sera également écartée. Bien qu'il lui soit complémentaire, il s'agit d'un phénomène disjoint du sentiment d'incarnation comme l'illustre la Figure 1.

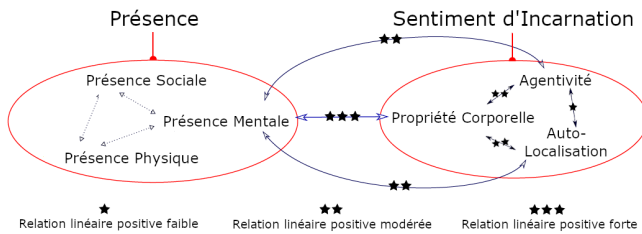


Figure 1: Aperçu de la relation entre les sentiments de présence et d'incarnation. Schéma adapté de [65].

D'autre part, nous nous conformons à la définition de la RA donnée par Azuma [4] qui spécifie que l'emplacement des éléments virtuels doit être perçu de la même manière que celui des objets physiques réels. Dès lors, cette précision met en marge les avatars superposés au monde réel sans notion de spatialité ou visionnés sur des écrans affichant un environnement virtuel (e.g. Frohner *et al.* [22]). En revanche, les avatars visualisés par l'intermédiaire de "miroirs" ne sont pas révoqués du moment qu'ils donnent l'impression d'être le reflet d'un élément présent dans l'environnement réel (e.g. Nimcharoen *et al.* [46]).

2 EXPÉRIMENTATION DU SENTIMENT D'INCARNATION EN RA

A ce jour, encore peu d'expérimentations du sentiment d'incarnation ont été réalisées en RA. Avant d'employer cette technologie, les chercheurs se sont d'abord placés dans un cadre plus simple, entièrement réel. Les premières expériences ont mis en œuvre une stimulation corporelle et visuelle synchrone afin de créer l'illusion

de posséder une main en caoutchouc : il s'agit de la *Rubber Hand Illusion* (RHI) [13]. En 2008, Petkova et Ehrsson [48] montrent que cette expérience peut se généraliser au corps entier par la mise au point d'une *Body Ownership Illusion* (BOI). En donnant aux participants le point de vue d'un mannequin en plastique à l'aide d'une caméra et en touchant les deux corps en même temps et identiquement, ils parvinrent à leur donner l'illusion de l'incarner. La question se posa ensuite dans le cadre de la RV et de la RA. Est-il possible de se sentir incarner un avatar 3D et comment provoquer ce sentiment ?

Pour commencer l'exploration de ce sujet, une variante de la RHI appelée *Virtual Hand Illusion* (VHI) fut mise au point par Raz *et al.* [51]. Cette variante remplace la main en caoutchouc par une main virtuelle 3D et applique les mêmes stimulations visuo-tactiles (VT) synchrones. Que ce soit en RA ou en RV, la comparaison faite par Škola *et al.* [74] montre que les dérives proprioceptives (variations de l'auto-localisation vers la fausse main) observées sont les mêmes avec une main virtuelle qu'avec une main en plastique, indiquant ainsi l'existence du sentiment d'incarnation.

L'expérience fut généralisée au corps entier pour voir si la stimulation VT synchrone pouvait également générer une BOI avec un corps complètement virtuel. Cependant, la recherche étudiant une telle expérience en RA est quasi-inexistante alors qu'elle est presque exhaustive en RV, comme l'indiquent plusieurs revues de littérature à ce sujet [33, 62]. Des recherches sont donc nécessaires pour mesurer précisément l'impact de la stimulation VT sur l'incarnation d'un avatar en RA. On peut cependant noter qu'en RV, l'analyse du sentiment d'incarnation des participants a montré un grand nombre de fois que ce type de stimulation se révèle efficace, et cela avec plusieurs types d'avatars virtuels [33].

La combinaison du sens du toucher et de la vue n'est pas la seule à être capable d'occasionner le sentiment d'incarnation en RA : en effet, l'illusion peut aussi apparaître en présence de stimuli visuo-moteurs (VM). Cette intuition déjà soutenue par de multiples résultats positifs en RV [18, 35, 64] fut confirmée en RA par l'implémentation d'une nouvelle VHI [61]. Dans cette variante, le stimulus tactile fut remplacé par la possibilité de bouger la main virtuelle. De même que pour les stimulations VT, la synchronisation des mouvements de la main réelle et de la main virtuelle s'est montrée nécessaire à la création de l'illusion [21]. Cette expérience met en évidence le sentiment d'agentivité comme étant l'un des piliers du sentiment d'incarnation en RA, au même niveau que le sentiment de propriété corporelle. Elle expose également l'indépendance de ces deux composantes, déjà soulevée précédemment [30] : la suppression de l'un de ces piliers ne brise pas le sentiment d'incarnation tant que l'autre reste en place, mais la présence simultanée des deux dans des conditions synchrones le renforce [23]. Dès lors, une façon d'amplifier le sentiment d'incarnation est de maximiser ses composantes.

Un facteur important dans les expériences précédemment citées est la synchronie de la stimulation appliquée. Zoulias *et al.* [73] soulignent la sensibilité de l'illusion à ce facteur en montrant que de petits retards ont un effet négatif, surtout lorsque la stimulation tactile précède le signal visuel. Cette influence de la synchronie fut retrouvée dans la VHI en RA [23], mais son importance n'a pas été aussi clairement évaluée qu'en RV. En particulier, Slater *et al.* [43] ont montré qu'une immersion suffisamment ancrée en RV pouvait maintenir un fort sentiment d'incarnation en présence de stimuli

asynchrones. L'utilisateur interprète alors (à tort) les sensations tactiles comme provenant d'objets virtuels de la scène. La possibilité que l'illusion puisse persévérer de manière analogue nécessite des recherches approfondies.

Une autre question inabordable est celle de la suppression du stimulus visuel en RA. L'expérience de la *Somatic Hand Illusion* réalisée par Ehrsson *et al.* a montré que l'on peut se passer de la vision pour évoquer le sentiment d'incarnation [19]. Dans leur protocole, l'expérimentateur déplace l'index gauche du participant aux yeux bandés de manière à ce qu'il touche une main en caoutchouc. Simultanément, la vraie main droite du participant est touchée aussi identiquement que possible, ce qui a pour effet de provoquer une dérive proprioceptive. En RV, ces résultats furent également observés dans l'expérience de Slater *et al.* [60] où l'utilisateur présente un fort sentiment d'incarnation sans fixer des yeux la main qui lui touche l'épaule. Les auteurs expliquent que l'agentivité couplée à la vision à la première personne d'un monde virtuel riche en détails a mené à une proprioception suffisamment forte pour supprimer le besoin de regarder son corps. En RA, ce phénomène manque de littérature et des études vérifiant la transposition de ces résultats semblent donc nécessaires.

3 MESURE DU SENTIMENT D'INCARNATION EN RA

Dans l'expérience de la RHI originale, Botivnick et Cohen [13] ont choisi de concevoir un questionnaire à deux parties pour évaluer le sentiment d'incarnation. La première partie demande une description ouverte du ressenti des participants tandis que la deuxième est constituée de neuf questions dont les réponses sont à donner sur une échelle de Likert [40]. Cette démarche suscita un grand intérêt et donna suite à de nombreuses travaux qui, face au manque de méthodes de mesures validées, s'en inspirèrent. Certains chercheurs modifièrent le questionnaire, d'autres supprimèrent la partie descriptive ou ne gardèrent que celle-ci, ce qui rendit les résultats difficilement comparables.

Confrontés à ce problème, plusieurs scientifiques se sont efforcés à vérifier et à unifier les méthodes de mesure par analyse systématique. Longo *et al.* [41] conclurent de leurs observations que les échelles de Likert sont des outils valides étant donné qu'il est possible d'identifier des motifs distinctifs dans les réponses. Cependant, elles doivent autant que possible être secondées par une mesure objective, fournissant un instrument de validation complémentaire. D'après eux, l'utilisation seule des méthodes traditionnelles de la psychologie - tel que la description verbale ouverte - est trop subjective pour extraire une mesure précise du sentiment d'incarnation. Il s'agit donc de la combiner avec d'autres mesures tel que celles de caractéristiques physiologiques. Par exemple, l'évaluation de la dérive proprioceptive par la soustraction de la position estimée à la position réelle de la main pourra être utilisée. Une autre mesure régulièrement employée est celle de l'enregistrement de la Réponse en Conductance Cutanée (RCC) du participant face à une menace physique. Dans un contexte contrôlé de façon à minimiser les biais, il a été montré plusieurs fois que cette mesure constitue un indicateur valide [3, 48] du sentiment d'incarnation.

Reprenant les travaux de Longo *et al.*, Kilteni et Slater [32] ajoutent que l'observation à partir d'un certain seuil d'au moins

une des trois sous-composantes du sentiment d'incarnation suffit pour le juger comme présent. Ainsi, les échelles de Likert utilisées devraient *a minima* compter des questions sur les sentiments d'agentivité, de propriété corporelle et d'auto-localisation. D'autre part, leur recherche fait remarquer que le sentiment d'agentivité doit être obligatoirement mesuré en présence de mouvements du corps incarné, un corps immobile ne pouvant susciter ce sentiment.

Disposant de plus de recul, des travaux récents cherchent à établir un questionnaire standard afin d'augmenter la comparabilité des futurs travaux. Gonzalez-Franco et Peck [24] identifient un ensemble de questions à normaliser que Roth *et al.* reprennent pour parvenir à un premier questionnaire [57], revu en 2019 pour contenir 16 items [56]. Les questions furent conçues de manière à être applicables à tous les scénarios, y compris à ceux en RA. Déterminés par analyse en composantes principales de la littérature, les items choisis évaluent trois caractéristiques : le niveau d'acceptation du corps (couvrant la propriété corporelle), celui du sentiment de contrôle (couvrant l'agentivité) et celui du sentiment de changement (incluant l'auto-localisation). Lors de sa conception, leur proposition fut testée et validée par quatre études puis par des analyses statistiques de fiabilité (calcul du coefficient alpha de Cronbach [12]). A l'heure actuelle, ce questionnaire semble constituer l'échelle de Likert la plus appropriée pour mesurer le sentiment d'incarnation en RA.

4 VISUALISATION DE L'AVATAR EN RA

4.1 Support de visionnage

Combiner la réalité à la virtualité de manière cohérente n'est pas une tâche facile. En effet, les systèmes de RA actuels connaissent de nombreuses limites dont la plupart sont d'origine matérielle. C'est le cas des systèmes comportant une visualisation de type *Optical See-through* (OST): utilisant des verres optiques semi-réfléchissants, ils ne peuvent générer que des rendus partiellement transparents. Un avatar visionné avec un casque de ce type sera donc contraint à être plus ou moins opaque en fonction des conditions lumineuses. Toutefois, l'effet de cette transparence sur le sentiment d'incarnation n'a pas encore été examiné et la lumière ambiante demeure maîtrisable dans un nombre d'applications.

Une alternative aux appareils OST est la technologie *Video See-through* (VST), déjà communément utilisée sur *smartphone*. Elle offre une vision indirecte du monde réel, observé au travers d'une caméra sur un écran ou dans un casque. Un traitement du flux vidéo en temps réel permet d'incruster l'avatar dans la scène et de le visualiser en 3D grâce aux mêmes techniques de stéréoscopie que celles utilisées en RV. Si cette approche semble être une bonne solution, plusieurs études argumentent que la VST a ses défauts aussi [6, 26, 52]. Dans le cas de leur application de visualisation médicale, Rolland et Fuchs [52] ont observé que les casques de type VST entravent la vision du monde réel et en perturbent sa perception, tandis que ceux de type OST fournissent une "visualisation non obstruée de l'environnement réel qui garantit que les informations visuelles et de proprioception sont synchronisées". Cependant, ils relativisent leur constat en écrivant que le choix de la technologie doit dépendre du type d'application considéré : le besoin des fonctionnalités supplémentaires offertes par l'affichage VST (e.g. l'opacité du virtuel) peut justifier la perte de la vue directe sur le monde réel.

Le choix de support à faire pour maximiser le sentiment d’incarnation en RA n’est pas encore clair aujourd’hui. Un élément de réponse se trouve dans l’étude des conséquences de la visibilité simultanée du corps réel et du corps virtuel. Cette question fut peu examinée, mais des études récentes suggèrent qu’il est possible d’avoir le sentiment d’incarner un avatar malgré l’observation de ces deux corps (cf. Section 4.2).

4.2 Perspective et visibilité

Un avatar peut être visualisé en RA sous plusieurs angles et perspectives qui changent la façon d’appréhender son incarnation. Est-il possible de se sentir incarner un corps sans être à l’intérieur de celui-ci ? Et dans ce cas, est-il possible d’incarner son avatar et son propre corps en même temps, tous deux étant visibles ? Ces questions ont une importance non-moindre dans le développement d’applications en RA employant des avatars puisqu’elles font ressortir les limites de l’expérience utilisateur en fonction des technologies utilisées. En RV, le point de vue à favoriser (1^{ère} ou 3^{ème} personne) est déjà sujet à désaccord [27, 60]. D’un autre côté, en RA, le nombre de cas où son propre avatar est tout simplement visible est limité.

Les outils de collaboration comptent pour une large partie des applications mettant en œuvre des avatars en RA. Dans ces outils, l’avatar n’est en général visible que pour l’interlocuteur et non pour l’utilisateur [50, 68, 70]. La plupart des cas où l’on peut voir son propre avatar en RA sont des “miroirs augmentés” grâce auxquels on peut l’observer comme un reflet de soi-même [46]. Les applications en RA affichant des avatars d’un point de vue égocentrique sont très rares, et celles où l’on peut y voir son corps en entier comme dans les travaux de Noh *et al.* [47] le sont encore plus.

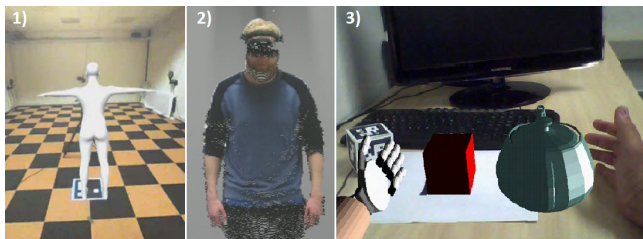


Figure 2: Exemples illustrant les différentes perspectives de visionnage de l’avatar en RA. 1) Système VST avec avatar devant, dos à l’utilisateur [55], 2) OST avec avatar de face, dans un miroir [47], 3) VST avec avatar superposé au corps de l’utilisateur [32].

Un des uniques articles examinant la question du point de vue en RA est celui de Rosa *et al.* [54], issu des travaux de thèse de van Bommel [65]. Dans cette recherche, les auteurs tentent de montrer qu’il peut exister un sentiment d’incarnation considérable même en regardant l’avatar à distance de soi. Pour appuyer cette assertion, ils conçurent une expérience où des participants équipés de casques VST manipulent leur avatar placé en avant, dos à eux (Figure 2.1). Un questionnaire sur le sentiment d’incarnation fut utilisé pour évaluer l’agentivité, la propriété corporelle et l’auto-localisation ressentie. Les résultats ont montré qu’une stimulation VM synchrone a su induire un fort sentiment d’agentivité, mais un trop faible nombre de participants a témoigné d’une dérive proprioceptive ou de

ressentir être aux deux localisations en même temps pour tirer des conclusions au sujet de l’auto-localisation. Enfin, l’évaluation du sentiment de propriété corporelle a donné des résultats positifs qui furent corroborés par des mesures physiologiques (RCC). Ces résultats ont été jugés comme preuves suffisantes pour satisfaire l’hypothèse qu’il n’est pas nécessaire d’être à l’intérieur du corps de son avatar pour avoir le sentiment de l’incarner en RA.

Dans une publication précédente, Rosa suggère que le lien entre l’avatar et le participant produit par ce type d’expérience est potentiellement différent [53]. Elle évoque qu’il est possible de se sentir être dans deux corps à la fois, sous-entendant une duplication de l’identité corporelle. Cette théorie est appuyée par l’étude antérieure réalisée par Heydrich *et al.* [27] mettant également en place le visionnage de son propre avatar de dos, à distance. Dans cet article, les auteurs cherchent à mettre en évidence la même théorie et à en comparer les résultats d’un rendu VST à ceux d’un rendu virtuel 3D. Pour les deux rendus, les analyses ont rapporté que la stimulation VT synchrone a produit la sensation d’avoir deux corps à la fois et un changement d’auto-localisation du participant vers le corps virtuel. Cependant, s’ils ont réussi à détecter le sentiment d’incarnation envers les deux corps, les auteurs reconnaissent qu’ils n’ont pas utilisé de mesure objective de la double sensation de propriété corporelle. D’autre part, leurs résultats suggèrent que la fidélité visuelle a un impact important dans la sensation d’incarner plus d’un corps. En effet, le visionnage VST préservant l’apparence du participant, a engendré des résultats bien plus forts que ceux obtenus avec un avatar 3D généré par ordinateur. Dans le mémoire de thèse de van Bommel [65], les mesures de dérive proprioceptive peu concluantes ont donc pu être influencées par l’apparence des avatars utilisés, anthropomorphes 3D mais graphiquement peu réalistes.

Inspiré par ces travaux, un second papier reprend les résultats de van Bommel et Rosa *et al.* avec un avatar d’apparence réaliste et fidèle à celle de l’utilisateur [46]. Dans cet article, les auteurs utilisent une caméra de profondeur pour synthétiser le corps du participant et l’afficher par OST dans un miroir 3D intégré à l’environnement réel (Figure 2.2). L’avatar animé par suivi de l’utilisateur est cette fois visualisé de face, couvert d’une texture vidéo. Basée sur une étude similaire menée en RV, leurs résultats montrent que les participants ont éprouvé un sentiment élevé de propriété corporelle et d’agentivité avec l’avatar dans le miroir. De plus, en demandant de choisir parmi plusieurs modifications réalistes de la morphologie de l’avatar, il fut reconnu que la perception de la masse corporelle en RA est similaire à celle en RV (*i.e.* les participants s’identifient à des corps légèrement plus minces).

5 APPARENCE ET MORPHOLOGIE DE L’AVATAR EN RA

En RV, il fut prouvé qu’un avatar de sexe [60], âge [7], ethnique [8] ou encore de silhouette différente [49] pouvait susciter un fort sentiment d’incarnation. Mieux encore, il est possible de créer cette illusion avec un corps dans un autre posture [17], avec un corps doté de membres supplémentaires [29], ou même avec un corps d’animal [1, 14, 36]. Qu’en est-il en RA ? De tels phénomènes sont-ils également possibles ?

Dans leurs travaux, Rosa *et al.* [54] comparent le sentiment d'incarnation en RA en fonction du niveau d'anthropomorphisme de l'avatar. Leur expérience utilise la VST pour faire incarner aux participants un avatar à physiologie humaine neutre (androgyne, sans couleur distinctive) puis un avatar abstrait aux membres représentés par des blocs. De manière analogue aux précédentes recherches, le sentiment d'incarnation fut évalué par questionnaire et par mesure de la RCC. Dans les deux cas, le sentiment d'incarnation a bien été induit et s'est vu modulé par la synchronie de la stimulation VM, mais pas par le niveau d'anthropomorphisme.

La relation entre la proprioception et le ressemblance physique des avatars à leur utilisateur n'a pas fait l'objet de l'article de Rosa *et al.*, se concentrant uniquement sur l'influence de la morphologie humaine globale. En RV, en revanche, diverses comparaisons ont été faites [58] : entre humain et robot, entre femme et homme, entre rendu réaliste et rendu *cartoon*, etc. De manière générale, il fut noté que les avatars humains réalistes ont tendance à créer un sentiment d'incarnation moins fort que les avatars non-humains ou au rendu irréaliste [2, 42, 66]. Une explication donnée est que ces résultats pourraient être dus au phénomène d'*Uncanny Valley* conceptualisé par Mori [45]. En particulier, Schwind *et al.* [58] remarquent une tendance à être beaucoup plus critiques envers l'apparence de mains réalistes, surtout chez les participants femmes. Cette spécificité est due à la différence de perception du corps qui existe entre les sexes dont un aperçu est donné par Piryankova *et al.* [49].

Au cours de sa thèse de master, Gilbers [23, 55] s'intéresse à l'incarnation de corps à structures différentes. Sa recherche met en place l'expérience de la *Supernumary Hand Illusion* en RA où le corps visible des participants est agrémenté d'un troisième bras virtuel, stimulé de manière VT et/ou VM synchrone avec l'un des deux autres bras réels (Figure 3.1). Le sentiment d'incarnation du bras virtuel, mesuré aussi par questionnaire et RCC, a montré que les trois composantes du sentiment peuvent être évoquées sur le bras virtuel en présence des deux bras réels visibles. Les réponses au questionnaire montrent en outre que le sentiment d'agentivité a été fortement ressenti sur le bras virtuel, et que la visibilité simultanée des trois bras a engendré l'impression de posséder un bras à un emplacement supplémentaire.

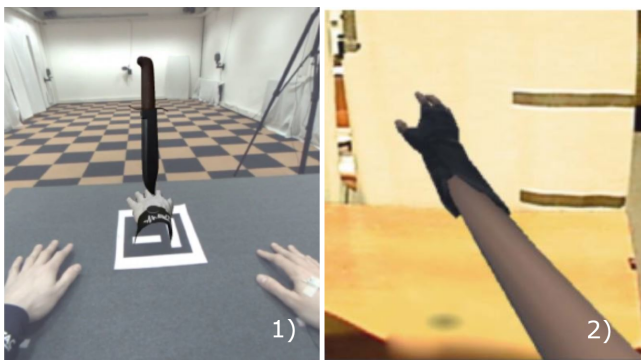


Figure 3: 1) *Supernumary Hand Illusion* en RA [23]. Un couteau virtuel tombe sur la main virtuelle afin de mesurer la RCC du sujet. 2) Incarnation d'un très long bras en RA [21].

Dans une autre étude, Feuchtner et Müller [21] s'interrogent sur l'étendue des modifications que l'on peut faire sur un avatar avant que le sentiment d'incarnation ne soit brisé. Ils parviennent à montrer que l'humain est capable d'utiliser des bras s'allongeant jusqu'à plus de deux fois leur taille normale tout en les ressentant comme les leurs. Ces résultats sont à l'image de ceux précédemment obtenus en RV, témoignant de la souplesse de notre notion d'identité corporelle [34]. Cependant, ces expériences montrent également que cette flexibilité semble avoir des limites : si le sentiment d'incarnation était bien présent pour des bras de longueur deux fois plus grande comme en Figure 3.2, il se voyait considérablement réduit pour des bras de longueur quatre fois plus grande.

6 MAXIMISER LE SENTIMENT D'INCARNATION EN RA

De manière générale, la stratégie employée par les chercheurs pour maximiser le sentiment d'incarnation en RA est la même que dans les autres contextes: elle consiste à créer et à intensifier les sentiments d'agentivité, d'auto-localisation et de propriété corporelle de l'utilisateur envers son avatar.

Le sentiment d'agentivité est lié à l'aisance de manipulation. Moins l'utilisateur a besoin de réfléchir à comment contrôler son avatar, et plus il fera abstraction de la virtualité de son corps [5]. Il est également lié à la notion de "réalisme comportemental", reflété par le nombre de comportements d'un humain que l'avatar présente. De ce fait, l'agentivité est favorisée par les systèmes capables de suivre et d'afficher le comportement utilisateur en temps réel, de manière précise et exhaustive. Ces résultats ont été montrés valables en RA, notamment par van Bommel *et al.* [65] qui ont réussi à obtenir une évaluation élevée du sentiment d'agentivité par capture des mouvements en temps réel du corps entier.

Afin d'obtenir un tel suivi, de nombreuses solutions de *tracking* existent à des prix et performances plus ou moins élevées (trackers HTC Vive, MoCap, Optitrack, OpenPose, etc.). A l'heure actuelle, les moins coûteuses sont aussi les plus limitées en ressources. Or, plusieurs études en RV [63, 67] ont montré que certaines formes d'erreurs de *tracking* (latence, sauts, bruit, figement, etc.) peuvent vivement affecter le sentiment d'incarnation. D'après Toothman et Neff [63], la latence et le bruit (vibration de l'avatar) apparaissent être des facteurs particulièrement limitants du sentiment d'agentivité à partir de seuils relativement peu élevés (300ms et 1 degré, respectivement). Les sauts et figements d'images, eux, n'ont pas une grande incidence, sauf quand poussés à l'extrême ou combinés avec d'autres types d'erreurs. Néanmoins, on peut imaginer que ces erreurs de *tracking* auront des conséquences légèrement plus poussées en RA qu'en RV, la présence d'artefacts perturbant l'unité visuelle entre le réel et le virtuel. Cette supposition sollicite une étude approfondie qui pourrait préconiser l'usage de certaines technologies plutôt que d'autres afin de maximiser le sentiment d'incarnation.

Pour intensifier les sentiments de propriété corporelle et d'auto-localisation, plusieurs méthodes autres que la stimulation VT synchrone existent. En effet, Suzuki *et al.* [61] ont montré dans leurs travaux en RA que rendre le pouls de l'utilisateur visible en faisant rougir faiblement la peau de l'avatar amplifiait le sentiment de posséder la main virtuelle incarnée. D'autre part, l'étude de Gorisse

Travaux	Visionnage	Support	Point de vue	Avatar	Stimulus	Etude
Gilbers [23]	OST	Casque RA	1 ^{ère} pers.	Humain neutre	VT, VM	VHI
Škola et Liarakapis [74]	VST	Lunettes LCD	1 ^{ère} pers.	Humain neutre	VT	RHI, VHI
Suzuki <i>et al.</i> [61]	VST	Visiocasque 3D	1 ^{ère} pers.	Vidéo 3D du sujet	VT, VM	VHI
Nimcharoen <i>et al.</i> [46]	OST	Casque RA	3 ^{ème} pers.	Vidéo 3D du sujet	VM	BOI miroir
Rosa et al. [54]	VST	Casque RV	3 ^{ème} pers.	Humain neutre, abstrait	VM	BOI
van Bommel [65]	VST	Casque RV	3 ^{ème} pers.	Humain neutre, abstrait	VM	BOI
Heydrich <i>et al.</i> [27]	VST	Casque RV	3 ^{ème} pers.	Vidéo 3D du sujet	VT, VM	BOI
Rosa <i>et al.</i> [55]	VST	Casque RV	1 ^{ère} pers.	Humain neutre	VT	3 ^{ème} bras
Feuchtner et Müller [21]	VST	Casque RV	1 ^{ère} pers.	Humain masculin	VT, VM	Bras extensible
Ballestin <i>et al.</i> [6]	OST, VST	Casque RV, RA	1 ^{ère} pers.	Gants de boxe	-	Comparatif OST/VST
Noh <i>et al.</i> [47]	VST	Casque RV	1 ^{ère} pers.	Cartoon, Vidéo 3D	-	Téléprésence
Lopes <i>et al.</i> [31]	VST	Casque RV	1 ^{ère} pers.	Prothèse de bras	-	Prothèses
Rosa [53]	-	-	-	-	-	Plan de recherche

Table 1: Liste de publications implémentant l'expérience d'incarnation d'un avatar virtuel en RA.

[25] dédiée à la comparaison des points de vue pris en RV identifie de légères différences dans les sensations qu'ils provoquent. En effet, la perspective à la 1^{ère} personne induit une impression supérieure d'être situé à l'intérieur du corps virtuel et de le posséder. D'après Gorisse, ces sentiments restent toutefois relativement élevés dans l'autre perspective, probablement grâce à la "synchronie VM identifiée par la littérature comme un facteur prépondérant du sentiment d'incarnation". Enfin, aucune différence significative ne fut observée en ce qui concerne le sentiment d'agentivité, ce dernier étant très élevé quel que soit le point de vue utilisé à conditions égales. Ainsi, deux des trois facteurs constituant le sentiment d'incarnation ont été prouvés comme impactés par la perspective en RV. Cette question reste à être éclaircie en RA et pourrait potentiellement encourager le développement du visionnage égocentrique des avatars, encore très peu exploité.

7 DISCUSSION ET CONCLUSION

Le nombre d'articles traitant du sentiment d'incarnation d'avatars virtuels *spécifiquement* en RA est très limité. Le Tableau 1 résume les travaux existants sur ce sujet précis et montre qu'il reste encore beaucoup à explorer. Cependant, de l'ensemble de ces études, nous pouvons déjà conclure que le sentiment d'incarnation en RA a plusieurs points communs avec celui en RV. Rosa et ses collègues ont particulièrement travaillé à les mettre en évidence. Ainsi, la synchronie des stimulations VM et VT se révèle être tout aussi efficace en RA qu'en RV dans l'induction d'une dérive proprioceptive [55]. Les mêmes mécanismes peuvent être utilisés pour changer la perception de son propre corps, par exemple en donnant l'illusion de posséder une troisième main ou un bras extensible [23]. De même, comme pour la RV, il fut constaté que les expériences "hors-corps" sont également réalisables en RA [54].

Parmi les pistes inexploitées, l'étude de la BOI d'un point de vue égocentrique peut se révéler particulièrement intéressante. En effet, comme souligné en Section 4.2, il est possible qu'être "dans la peau" de son avatar engage un sentiment d'incarnation plus avancé qu'en le visionnant à la 3^{ème} personne. La mise en place d'une perspective à la 1^{ère} personne est toutefois techniquement plus difficile qu'en RV,

étant donné que le corps physique est présent dans l'environnement réel visualisé. Par conséquent, il est beaucoup plus compliqué de masquer notre corps réel lorsqu'il s'agit d'incarner un avatar plus fin ou non-anthropomorphe tel qu'un quadrupède. Ces défis techniques restent à être abordés.

Par ailleurs, la similarité globale des résultats obtenus en RA à ceux en RV [34, 39, 42] laisse penser que la perception de notre corps est proche dans ces deux contextes. D'une part, le physique semble jouer un rôle important dans l'affinité entre un utilisateur et son avatar tandis que leur non-ressemblance n'empêche pas la création du sentiment d'incarnation [58]. D'autre part, il fut montré à plusieurs reprises que la façon dont nous percevons notre corps est souvent en marge de la réalité [46], de la même manière que notre voix enregistrée semble différente de celle que nous entendons en parlant. Cette déformation de notre perception est d'autant plus importante qu'elle est subjective : par exemple, une personne souffrant d'anorexie peut voir son corps plus gros qu'il ne l'est [44]. On peut donc se demander si, au final, le choix de l'avatar auquel l'utilisateur s'identifie le plus ne serait pas le meilleur en terme de sentiment d'incarnation, que cet avatar lui ressemble ou non. Il semblerait alors intéressant de laisser la possibilité aux utilisateurs de choisir certains attributs visuels de l'avatar pour les représenter. Cependant, la relation entre l'affinité subjective et l'ampleur du sentiment d'incarnation reste à être éclaircie, et quelle que soit la réponse à cette question, ne pas laisser le choix de l'apparence de l'avatar semble justifié dans de nombreuses applications (par exemple, dans les travaux de Banakou *et al.* [9]).

Enfin, il reste matière à étudier dans l'influence qu'a l'apparence de l'avatar, notamment en terme de choix à faire pour produire le meilleur sentiment d'incarnation. A cette question se joint une autre : contrairement à la RV qui bénéficie d'une homogénéité visuelle, la RA présente un problème de cohérence graphique entre le réel et le virtuel auquel l'œil humain est sensible. Ainsi, la poursuite de travaux procurant des rendus temps-réel plus réalistes vis-à-vis de l'environnement physique (lumières, spatialisations, occultation, etc.) [15, 37, 38, 72] voit son importance soulevée.

Pour terminer, une recherche approfondie sur l'incarnation en RA pourra être bénéfique dans de nombreux scénarios. Par exemple,

elle pourrait être utile dans les applications mettant en avant une expérience utilisateur personnalisée tel que dans les jeux-vidéos, le cinéma et dans d'autres types d'art [11]. Cette recherche trouve également sa raison d'être dans l'éducation, étant donné l'influence prouvée des avatars sur notre perception et notre comportement [8, 9]. Enfin et surtout, les avatars sont prometteurs dans le domaine médical, notamment dans le cadre des thérapies, des prothèses virtuelles ou encore d'opérations médicales à distance [10, 20, 52].

REFERENCES

- [1] Sun Joo Grace Ahn, Joshua Bostick, Elise Ogle, Kristine L. Nowak, Kara T. McGillicuddy, and Jeremy N. Bailenson. 2016. Experiencing Nature: Embodying Animals in Immersive Virtual Environments Increases Inclusion of Nature in Self and Involvement With Nature. *Journal of Computer-Mediated Communication* 21 (Nov. 2016), 399–419. <https://doi.org/10.1111/jcc4.12173>
- [2] Ferran Argelaguet, Ludovic Hoyet, Michael Trico, and Anatole Lecuyer. 2016. The Role of Interaction in Virtual Embodiment: Effects of the Virtual Hand Representation. In *2016 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. Greenville, South Carolina, USA, 3–10. <https://doi.org/10.1109/VR.2016.7504682>
- [3] K. Carrie Armel and V. S. Ramachandran. 2003. Projecting Sensations to External Objects: Evidence From Skin Conductance Response. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 270 (July 2003), 1499–1506. <https://doi.org/10.1098/rspb.2003.2364>
- [4] Ronald T. Azuma. 1997. A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 6 (1997), 355–385. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
- [5] William Sims Bainbridge. 2004. *Berkshire Encyclopedia of Human-computer Interaction*. Berkshire Publishing Group LLC, Great Barrington, Massachusetts, USA.
- [6] Giorgio Ballestin, Fabio Solari, and Manuela Chessa. 2018. Perception and Action in Peripersonal Space: A Comparison Between Video and Optical See-Through Augmented Reality Devices. In *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*. IEEE, Munich, Germany, 184–189. <https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct.2018.00063>
- [7] Domna Banakou, Raphaela Groten, and Mel Slater. [n.d.]. Illusory Ownership Of A Virtual Child Body Causes Overestimation Of Object Sizes And Implicit Attitude Changes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110 (n. d.). <https://doi.org/10.1073/pnas.1306779110>
- [8] Domna Banakou, Parasuram D. Hanumanthu, and Mel Slater. 2016. Virtual Embodiment of White People in a Black Virtual Body Leads to a Sustained Reduction in Their Implicit Racial Bias. *Frontiers in Human Neuroscience* 10 (Nov. 2016). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00601>
- [9] Domna Banakou, Sameer Kishore, and Mel Slater. 2018. Virtually Being Einstein Results in an Improvement in Cognitive Task Performance and a Decrease in Age Bias. *Frontiers in Psychology* 9 (June 2018), 917. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00917>
- [10] Alcimar Barbosa, Edgard Afonso Lamounier Junior, Adriano de Oliveira Andrade, and Alexandre Cardoso. 2012. Virtual and Augmented Reality: A New Approach to Aid Users of Myoelectric Protheses. (Oct. 2012). <https://doi.org/10.5772/50600>
- [11] Mark Billinghurst, Hirokazu Kato, and Ivan Poupyrev. 2001. The MagicBook – Moving Seamlessly Between Reality and Virtuality. *IEEE Computer Graphics and Applications* 21 (Feb. 2001), 6–9. <https://doi.org/10.1109/38.920621>
- [12] J Martin Bland and Douglas G Altman. 1997. Statistics notes: Cronbach's alpha. *BMJ* 314 (1997), 572. <https://doi.org/10.1136/bmj.314.7080.572>
- [13] Matthew Botvinick and Jonathan Cohen. 1998. Rubber Hands 'Feel' Touch That Eyes See. *Nature* 391 (Feb. 1998), 756–756. <https://doi.org/10.1038/35784>
- [14] Anthony L. Brooks, Eva Brooks, and Cristina Sylla. 2019. *Interactivity, Game Creation, Design, Learning, and Innovation: 7th EAI International Conference, ArtsIT 2018, and 3rd EAI International Conference, DLI 2018, ICTCC 2018*. Springer, Braga, Portugal.
- [15] Jiajian Chen, Greg Turk, and Blair MacIntyre. 2011. Painterly Rendering With Coherence For Augmented Reality. In *2011 IEEE International Symposium on VR Innovation*. IEEE, Suntec City, Singapour, 103–110. <https://doi.org/10.1109/ISVRI.2011.5759610>
- [16] Ke-Yu Chen, Shwetak N. Patel, and Sean Keller. 2016. Finexus: Tracking Precise Motions of Multiple Fingertips Using Magnetic Sensing. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM Press, Santa Clara, California, USA, 1504–1514. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858125>
- [17] Nonny de la Peña, Peggy Weil, Joan Llobera, Bernhard Spanlang, Doron Friedman, Maria V Sanchez-Vives, and Mel Slater. 2010. Immersive Journalism: Immersive Virtual Reality for the First-Person Experience of News. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 19 (Aug. 2010), 291–301. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00005
- [18] H. Henrik Ehrsson. 2012. The Concept of Body Ownership And Its Relation to Multisensory Integration. *The New Handbook of Multisensory Processes* (Jan. 2012), 775–792.
- [19] H. Henrik Ehrsson, Nicholas P. Holmes, and Richard E. Passingham. 2005. Touching a Rubber Hand: Feeling of Body Ownership Is Associated with Activity in Multisensory Brain Areas. *The Journal of Neuroscience* 25 (Nov. 2005), 10564–10573. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0800-05.2005>
- [20] Antonio Fernández-Caballero, Elena Navarro, Patricia Fernández-Sotos, Pascual González, Jorge J. Ricarte, José M. Latorre, and Roberto Rodríguez-Jiménez. 2017. Human-Avatar Symbiosis For the Treatment of Auditory Verbal Hallucinations in Schizophrenia Through Virtual/Augmented Reality and Brain-Computer Interfaces. *Frontiers in Neuroinformatics* 11 (Nov. 2017), 64. <https://doi.org/10.3389/fninf.2017.00064>
- [21] Tiare Feuchtner and Jörg Müller. 2017. Extending the Body for Interaction with Reality. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM Press, Denver, Colorado, USA, 5145–5157. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025689>
- [22] Jakob Frohner, Gionata Salvietti, Philipp Beckerle, and Domenico Prattichizzo. 2019. Can Wearable Haptic Devices Foster the Embodiment of Virtual Limbs? *IEEE Transactions on Haptics* 12 (July 2019), 339–349. <https://doi.org/10.1109/TOH.2018.2889497>
- [23] Carolien Gilbers. 2017. *The Sense of Embodiment in Augmented Reality: A Third Hand Illusion*. Master's thesis. Utrecht, Pays-Bas.
- [24] Mar Gonzalez-Franco and Tabitha C. Peck. 2018. Avatar Embodiment: Towards a Standardized Questionnaire. *Frontiers in Robotics and AI* 5 (June 2018), 74. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00074>
- [25] Geoffrey Gorisse, Olivier Christmann, Etienne Armand Amato, and Simon Richir. 2017. First- and Third-Person Perspectives in Immersive Virtual Environments: Presence and Performance Analysis of Embodied Users. *Frontiers in Robotics and AI* 4 (July 2017), 33. <https://doi.org/10.3389/frobt.2017.00033>
- [26] Timofey Y. Grechkin, Tien Dat Nguyen, Jodie M. Plumert, James F. Cremer, and Joseph K. Kearney. 2010. How Does Presentation Method And Measurement Protocol Affect Distance Estimation In Real And Virtual Environments? *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)* 7, 4 (July 2010), 1–18. <https://doi.org/10.1145/1823738.1823744>
- [27] Lukas Heydrich, Trevor J. Dodds, Jane E. Aspell, Bruno Herbelin, Heinrich H. Bühlhoff, Betty J. Mohler, and Olaf Blanke. 2013. Visual Capture And The Experience of Having Two Bodies – Evidence From Two Different Virtual Reality Techniques. *Frontiers in Psychology* 4 (2013). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00946>
- [28] Steven Hickson, Nick Dufour, Avneesh Sud, Vivek Kwatra, and Irfan Essa. 2019. Eyemotion: Classifying Facial Expressions in VR Using Eye-tracking Cameras. In *2019 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*. IEEE, Hawaii, USA, 1626–1635.
- [29] Ludovic Hoyet, Ferran Argelaguet, Corentin Nicole, and Anatole Lecuyer. 2016. "Wow! I Have Six Fingers!": Would You Accept Structural Changes of Your Hand in VR? *Frontiers in Robotics and AI* 3 (May 2016). <https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00027>
- [30] Andreas Kalckert and H. Henrik Ehrsson. 2012. Moving A Rubber Hand That Feels Like Your Own: A Dissociation of Ownership and Agency. *Frontiers in Human Neuroscience* 6 (2012). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00040>
- [31] Edgard Afonso Lamounier Kenedy Lopes. 2013. Using Augmented Reality Techniques to Simulate Myoelectric Upper Limb Protheses. *Journal of Bioengineering and Biomedical Sciences* (2013). <https://doi.org/10.4172/2155-9538.S1-010>
- [32] Konstantina Kilteni, Raphaela Groten, and Mel Slater. 2012. The Sense of Embodiment in Virtual Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 21 (Nov. 2012), 373–387. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00124
- [33] Konstantina Kilteni, Antonella Maselli, Konrad P. Kording, and Mel Slater. 2015. Over My Fake Body: Body Ownership Illusions For Studying The Multisensory Basis Of Own-body Perception. *Frontiers in Human Neuroscience* 9 (March 2015). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00141>
- [34] Konstantina Kilteni, Jean-Marie Normand, Maria V. Sanchez-Vives, and Mel Slater. 2012. Extending Body Space in Immersive Virtual Reality: A Very Long Arm Illusion. *PLoS ONE* 7 (July 2012), e40867. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040867>
- [35] Elena Kokkinara and Mel Slater. 2014. Measuring the Effects Through Time of the Influence of Visuomotor and Visuo-tactile Synchronous Stimulation on a Virtual Body Ownership Illusion. *Perception* 43 (Jan. 2014), 43–58. <https://doi.org/10.1068/p7545>
- [36] Andrey Krekhov, Sebastian Cmentowski, and Jens Krüger. 2019. The Illusion of Animal Body Ownership and Its Potential for Virtual Reality Games. In *2019 IEEE Conference on Games (CoG)*. IEEE, London, UK, 1–8.
- [37] Peter Kán and Hannes Kafumann. 2019. DeepLight: Light Source Estimation For Augmented Reality Using Deep Learning. *The Visual Computer* 35 (June 2019), 873–883. <https://doi.org/10.1007/s00371-019-01666-x>
- [38] Peter Kán and Hannes Kaufmann. 2012. High-quality Reflections, Refractions, And Caustics in Augmented Reality and Their Contribution to Visual Coherence. In *2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*. IEEE, Atlanta, Georgia, USA, 99–108. <https://doi.org/10.1109/>

- ISMAR.2012.6402546
- [39] Bireswar Laha, Jeremy N. Bailenson, Andrea Stevenson Won, and Jakki O. Bailey. 2016. Evaluating Control Schemes for the Third Arm of an Avatar. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 25 (Nov. 2016), 129–147. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00251
- [40] Rensis Likert. 1932. A technique for the measurement of attitudes. *Archives of psychology* 22 (1932).
- [41] Matthew R. Longo, Friederike Schüür, Marjolein P.M. Kammers, Manos Tsakiris, and Patrick Haggard. 2008. What Is Embodiment? A Psychometric Approach. *Cognition* 107 (June 2008), 978–998. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.12.004>
- [42] Jean-Luc Lugrin, Johanna Latt, and Marc Erich Latoschik. 2015. Avatar Anthropomorphism and Illusion of Body Ownership in VR. In *2015 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, Arles, France, 229–230. <https://doi.org/10.1109/NR.2015.7223379>
- [43] Antonella Maselli and Mel Slater. 2013. The Building Blocks of the Full Body Ownership Illusion. *Frontiers in Human Neuroscience* 7 (March 2013). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00083>
- [44] Simone C. Mölbert, Anne Thaler, Betty J. Mohler, Stephan Streuber, Javier Romero, Michael J. Black, Stephan Zipfel, H-O. Karnath, and Katrin E. Giel. 2018. Assessing Body Image in Anorexia Nervosa Using Biometric Self-Avatars in Virtual Reality: Attitudinal Components Rather Than Visual Body Size Estimation Are Distorted. *Psychological Medicine* 48 (March 2018), 642–653. <https://doi.org/10.1017/S0033291717002008>
- [45] Masahiro Mori, Karl F. MacDorman, and Norri Kageki. 2012. The Uncanny Valley [From the Field]. *IEEE Robotics Automation Magazine* 19 (June 2012), 98–100. <https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2192811>
- [46] Chontira Nimcharoen, Stefanie Zollmann, Jonny Collins, and Holger Regenbrecht. 2018. "Is That Me?" – Embodiment and Body Perception with an Augmented Reality Mirror. In *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*. IEEE, Munich, Germany, 158–163. <https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct.2018.00057>
- [47] Seung-Tak Noh, Hui-Shyong Yeo, and Woontack Woo. [n.d.]. An HMD-based Mixed Reality System for Avatar-Mediated Remote Collaboration with Barehand Interaction, P. Figueroa M. Imura and B. Mohler (Eds.). *ICAT-EGVE 2015 - International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments*. <https://doi.org/10.2312/EGVE.20151311>
- [48] Valeria I. Petkova and H. Henrik Ehrsson. 2008. If I Were You: Perceptual Illusion of Body Swapping. *PLoS ONE* 3 (Dec. 2008). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003832>
- [49] Ivelina V. Piryankova, Hong Yu Wong, Sally A. Linkenauger, Catherine Stinson, Matthew R. Longo, Heinrich H. Bühlhoff, and Betty J. Mohler. 2014. Owning an Overweight or Underweight Body: Distinguishing the Physical, Experienced and Virtual Body. *PLoS ONE* 9 (Aug. 2014), e103428. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103428>
- [50] Thammathip Piumsomboon, Arindam Dey, Barrett Ens, Gun Lee, and Mark Billinghurst. 2017. [POSTER] CoVAR: Mixed-Platform Remote Collaborative Augmented and Virtual Realities System with Shared Collaboration Cues. In *2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*. IEEE, Nantes, France, 218–219. <https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct.2017.72>
- [51] Liat Raz, Patrice L. Weiss, and Miriam Reiner. 2008. The Virtual Hand Illusion and Body Ownership. In *Haptics: Perception, Devices and Scenarios*, Manuel Ferre (Ed.). Springer, Heidelberg, Germany, 367–372. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69057-3_47
- [52] Jannick P. Rolland and Henry Fuchs. 2000. Optical Versus Video See-Through Head-Mounted Displays in Medical Visualization. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 9 (June 2000), 287–309. <https://doi.org/10.1162/105474600566808>
- [53] Nina Rosa. 2016. Player/Avatar Body Relations in Multimodal Augmented Reality Games. In *Proceedings of the 18th ACM International Conference on Multimodal Interaction - ICMi 2016*. ACM Press, Tokyo, Japan, 550–553. <https://doi.org/10.1145/2993148.2997618>
- [54] Nina Rosa, Jean-Paul van Bommel, Wolfgang Hurst, Tanja Nijboer, Remco C. Veltkamp, and Peter Werkhoven. 2019. Embodying an Extra Virtual Body in Augmented Reality. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, Osaka, Japan, 1138–1139. <https://doi.org/10.1109/NR.2019.8798055>
- [55] Nina Rosa, Remco C. Veltkamp, Wolfgang Hürst, Tanja Nijboer, Carolien Gilberts, and Peter Werkhoven. 2019. The Supernumerary Hand Illusion in Augmented Reality. *ACM Transactions on Applied Perception* 16 (Aug. 2019), 1–20. <https://doi.org/10.1145/3341225>
- [56] Daniel Roth and Marc Erich Latoschik. 2019. Construction of a Validated Virtual Embodiment Questionnaire. *ArXiv abs/1911.10176* (Nov. 2019).
- [57] Daniel Roth, Jean-Luc Lugrin, Marc Erich Latoschik, and Stephan Huber. 2017. Alpha IVBO - Construction of a Scale to Measure the Illusion of Virtual Body Ownership. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. ACM Press, Denver, Colorado, USA, 2875–2883. <https://doi.org/10.1145/3027063.3053272>
- [58] Valentin Schwind, Pascal Knierim, Cagri Tasci, Patrick Franczak, Nico Haas, and Niels Henze. 2017. "These are not my hands!": Effect of Gender on the Perception of Avatar Hands in Virtual Reality. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM Press, Denver, Colorado, USA, 1577–1582. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025602>
- [59] Ari Shapiro, Anton Leuski, and Stacy Marsella. 2019. UBeBot: Voice-driven, Personalized, Avatar-based Communicative Video Content in AR. In *ACM SIGGRAPH 2019 Appy Hour on - SIGGRAPH '19*. ACM Press, Los Angeles, California, 1–2. <https://doi.org/10.1145/3305365.3329734>
- [60] Mel Slater, Bernhard Spanlang, Maria V. Sanchez-Vives, and Olaf Blanke. 2010. First Person Experience of Body Transfer in Virtual Reality. *PLoS ONE* 5 (May 2010). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010564>
- [61] Keisuke Suzuki, Sarah N. Garfinkel, Hugo D. Critchley, and Anith K. Seth. 2013. Multisensory integration across exteroceptive and interoceptive domains modulates self-experience in the rubber-hand illusion | Elsevier Enhanced Reader. *Neuropsychologia* (2013). <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.08.014>
- [62] Marko Teräs. 2015. *You Are Your Avatar Is You: Phenomenological Literature Review of Virtual Embodiment in Virtual Environments*. Technical Report.
- [63] Nicholas Toothman and Michael Neff. 2019. The Impact of Avatar Tracking Errors on User Experience in VR. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, Osaka, Japan, 756–766. <https://doi.org/10.1109/NR.2019.8798108>
- [64] Manos Tsakiris, Gita Prabhu, and Patrick Haggard. 2006. Having A Body Versus Moving Your Body: How Agency Structures Body-Ownership. *Consciousness and Cognition* 15 (June 2006), 423–432. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2005.09.004>
- [65] JG van Bommel. 2017. *Presence and Embodiment in Augmented Reality*. Master's thesis. Utrecht, Pays-Bas.
- [66] Vinoba Vinayagamoorthy, Andrea Brogni, Marco Gillies, Mel Slater, and Anthony Steed. 2004. An Investigation of Presence Response across Variations in Visual Realism. In *The 7th Annual International Presence Workshop*. Valencia, Spain, 148–155.
- [67] Thomas Waltemate, Irene Senna, Felix Hülsmann, Marieke Rohde, Stefan Kopp, Marc Ernst, and Mario Botsch. 2016. The Impact of Latency on Perceptual Judgments and Motor Performance in Closed-loop Interaction in Virtual Reality. In *Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology - VRST '16*. ACM Press, Munich, Germany, 27–35. <https://doi.org/10.1145/2993369.2993381>
- [68] Tzu-Yang Wang, Yuji Sato, Mai Otsuki, Hideaki Kuzuoka, and Yusuke Suzuki. 2019. Effect of Full Body Avatar in Augmented Reality Remote Collaboration. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, Osaka, Japan, 1221–1222. <https://doi.org/10.1109/NR.2019.8798044>
- [69] Nick Yee and Jeremy Bailenson. 2007. The Proteus Effect: The Effect of Transformed Self-Representation on Behavior. *Human Communication Research* 33 (July 2007), 271–290. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2958.2007.00299.x>
- [70] Boram Yoon, Hyung-il Kim, Gun A. Lee, Mark Billinghurst, and Woontack Woo. 2019. The Effect of Avatar Appearance on Social Presence in an Augmented Reality Remote Collaboration. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, Osaka, Japan, 547–556. <https://doi.org/10.1109/NR.2019.8797719>
- [71] Zhengyou Zhang. 2012. Microsoft Kinect Sensor and Its Effect. *IEEE Multimedia* 19 (Feb. 2012), 4–10. <https://doi.org/10.1109/MMUL.2012.24>
- [72] Stefanie Zollmann and Gerhard Reitmayr. 2012. Dense Depth Maps From Sparse Models and Image Coherence for Augmented Reality. In *Proceedings of the 18th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology - VRST '12*. ACM Press, Toronto, Ontario, Canada, 53. <https://doi.org/10.1145/2407336.2407347>
- [73] Ioannis Dimitrios Zoulias, William Seymour Harwin, Yoshikatsu Hayashi, and Slawomir Jaroslaw Nasuto. 2016. Milliseconds Matter: Temporal Order of Visuotactile Stimulation Affects the Ownership of a Virtual Hand. In *10th International Conference, EuroHaptics 2016, Proceedings, Part II*, Fernando Bello, Hiroyuki Kajimoto, and Yon Visell (Eds.), Vol. 9775. Haptics: Perception, Devices, Control, and Applications, Springer International Publishing, London, UK, 479–489. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42324-1_47
- [74] Filip Škola and Fotis Liarokapis. 2016. Examining the Effect of Body Ownership in Immersive Virtual and Augmented Reality Environments. *The Visual Computer* 32 (June 2016), 761–770. <https://doi.org/10.1007/s00371-016-1246-8>