

Réalité Augmentée et environnement collaboratif : Un tour d'horizon

Raphaël Grasset, Jean-Dominique Gascuel

ARTIS / Laboratoire GRAVIR/IMAG UMR 527

INRIA Rhone-Alpes
655, Avenue de l'Europe
38330 Saint-Ismier Cedex

{Raphael.Grasset | Jean-Dominique.Gascuel}@imag.fr

Résumé : *La Réalité Augmentée (RA) est généralement définie comme une branche dérivée de la Réalité Virtuelle. D'une façon plus générale, le concept de réalité augmentée regroupe une approche multidisciplinaire visant un mélange entre réel et virtuel. La forte potentialité induite par cette connexion promet un cadre adéquat pour l'interaction 3D ou les applications collaboratives. On présente dans cet article un tour d'horizon des principaux travaux menés à ce jour dans le cadre de l'image et de la RA et plus particulièrement le cadre collaboratif.*

1 Introduction et historique

La réalité augmentée (RA) a vu le jour avec les travaux de Sutherland [Sut65], [Sut68] qui a réalisé le premier système dit de réalité augmentée, basé sur un casque suivi par un capteur de mouvement. Avec ce dispositif, l'utilisateur peut alors visualiser et naviguer autour d'éléments virtuels positionnés dans notre espace réel ; un des buts poursuivis par la RA. Durant les années 80 le concept de réalité augmentée a été surtout utilisé dans un cadre militaire, pour l'affichage d'informations virtuelles sur les visières des casques des pilotes d'avions (Head-Up Display (HUD)).

Le véritable essor de ce domaine a débuté durant les années 90 par les travaux de Bajura [BFO92], puis State [SLH⁺96], dans un cadre applicatif de médecine, pour donner au médecin la possibilité de visualiser directement des données d'imagerie à ultrasons sur le corps du patient, augmentant alors sa compréhension (interaction et visualisation dans un même espace). Feiner [FMS93] propose quant à lui un système interactif pour l'apprentissage et la maintenance d'une imprimante basée sur la superposition d'informations virtuelles (de fonctionnement), directement sur l'imprimante équipée de capteurs. Par la suite, la réalité augmentée s'est développée en introduisant un grand nombre d'applications cibles : médecine ([GLPI⁺96]) ingénierie/production ([CM92], [ABC⁺94]), architecture (visualisation augmentée [WFM⁺96], design [AKB⁺95]), robotique ([MZDD93]) et les loisirs [OSYT98].

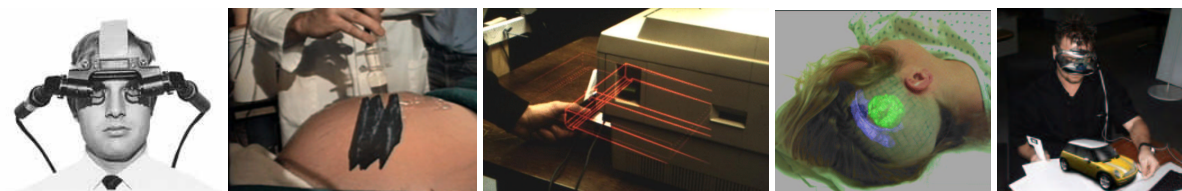


FIG. 1 – Réalité Augmentée de Sutherland à aujourd'hui (point de vue image de synthèse) : [Sut65], [BFO92], [FMS93], [GLPI⁺96], [KDB⁺02].

En parallèle, la réalité augmentée a aussi trouvé essor dans le domaine de l'interaction homme-machine (IHM). Wellner a proposé la possibilité d'interagir naturellement avec des documents numériques, par l'intermédiaire d'une projection de ces éléments dans notre monde réel (Digital Desk [Wel91]). Fitzmaurice [FIB95] puis Ishii [IU97] ont proposé dans ce contexte, le principe d'interagir à l'aide d'éléments réels pour modifier des éléments numériques remplaçant les interfaces classiques de bureau (WIMP) par des interfaces beaucoup plus souples et adaptées à l'utilisateur (interaction à deux mains, multiplexage spatial, externalisation du concept). Rekimoto [RN95] propose l'idée d'interagir sur le réel à travers un dispositif physique spécifique, le NaviCam. Dans la suite de nombreux chercheurs d'IHM se sont alors intéressés à cette relation virtuel-réel : [UI98], [BCG⁺01], [RP01].



FIG. 2 – Réalité Augmentée de Wellner à aujourd’hui (point de vue interaction homme-machine) : [Wel91],[FIB95], [IU97], [RN95], [PRI02b].

Une convergence maintenant dominante entre les différentes approches conduit la RA vers une approche multidisciplinaire regroupant des domaines tels que l’informatique graphique, l’interaction homme-machine, la vision, les travaux autour du travail collaboratif (TCAO ou CSCW, *Computer Supported Collaboratif Work*). Dans ce contexte, la forte réduction des coûts des dispositifs matériels, l’évolution du graphisme et la disponibilité d’outils simples et évolués ([KB99]) font maintenant de la réalité augmentée un domaine fortement accessible.

Durant les dernières années, les applications se sont étendues vers un plus grand nombre de domaines : la visualisation scientifique (chimie [FV02], mathématique [FLS97]), l’éducation (mathématique [HK03], astronomie [SH02]), la géographie [HBP⁺01], la culture ([HPF99]), des nouvelles applications en médecine ([BBB03]), en architecture (extérieur [TPG99], design [KBP⁺00]), en planification [JG02], maintenance ([Dal02]), production [Fri02], automobile ([KDB⁺02]), apprentissage ([JS99]) ou encore l’expression artistique [CWY⁺02] ou le jeu (en salle [Mur01], extérieur [TCD⁺00]).

Comme le souligne [ABB⁺01] les applications se tournent maintenant vers la mobilité (augmentation en se déplaçant dans un large espace) et le support multi-utilisateur (interagir simultanément en RA).

La Réalité Augmentée offre de nombreux avantages par rapport à des environnements de bureau numérique ou de réalité virtuelle : Feiner [FMS93] déclare à son propos *”Il y a beaucoup de situations pourtant dans lesquelles on souhaiterait pouvoir interagir avec notre environnement réel. La réalité augmentée permet de rendre cela possible en présentant un monde virtuel qui enrichit, au lieu de remplacer, le monde réel”*.

La suite de cet article présentera un aperçu des travaux relatifs au domaine de la RA et plus particulièrement à son aspect collaboratif. On note qu’au-delà de cette présentation, le lecteur pourra se reporter à [Azu97] et [ABB⁺01] qui offrent un tour d’horizon plus descriptif mais d’un point de vue uniquement image de synthèse non dédié au collaboratif. Revenons maintenant tous d’abord plus précisément au terme de réalité augmentée.

2 Terminologie

2.1 Définitions

Au niveau étymologique, Le Petit Robert nous donne comme définition :

- *réalité*. bas lat *relitas* (rien). 1. caractère de ce qui est réel, de ce qui ne constitue pas seulement un concept, mais une chose, un fait.3. ce qui est réel, actuel donné comme tel à l’esprit ;
- *augmentée*. vr tr. 1. rendre plus grand, plus considérable, par addition d’une chose de même nature.

Une interprétation directe peut être une incrémentation d’un contenu se voulant de même nature perçue de façon identique à l’esprit.

Dans la littérature, on note que le terme Réalité Augmentée a été introduit par [CM92] pour la première fois (ainsi que dans le domaine IHM par [Wel93]). Azuma propose de définir la RA en se reposant alors sur trois critères : mélange Réel/Virtuel (R/V), contrainte temps réel, alignement Réel/Virtuel.

Comme il le souligne dans [ABB⁺01] la réalité augmentée ne se limite pas uniquement à la vue mais permet aussi un mixage sur de multiples sens, olfactifs, tactiles, ainsi qu’auditifs ([MBWF97], [LGS00]).

Dans le domaine de l’IHM, différentes notions ont aussi été introduites suite aux travaux de références de Wellner : le concept prédominant reste d’offrir une meilleure accessibilité au contenu numérique (virtuel) en utilisant comme interface le réel - et ses possibilités d’appréhension.

Dans notre cas la définition au sens large que l'on utilise est "le fait de mélanger élément virtuel et élément réel dans un même contexte", unifiant le meilleur des deux mondes. Pour situer plus précisément ce terme on se reporte aux taxonomies proposées permettant d'identifier la réalité augmentée dans un cadre plus large.

2.2 Taxonomie

Milgram interprète la réalité augmentée incluse dans un continuum linéaire qui va du réel au virtuel [MK94]. Il définit le terme de *réalité mixte (mixed reality)* l'intervalle entre le réel et le virtuel. Cette réalité mixte contient la réalité augmentée mais aussi la virtualité augmentée, qui consiste à intégrer du virtuel dans le monde réel. Il étend cette taxonomie des systèmes d'affichages de RA sur trois principes fédérateurs : portée de la connaissance du monde, fidélité de reproduction, portée de la métaphore de présence. [Mac96] propose une approche centrée sur le contenu augmenté : utilisateur, objet ou environnement. [Bér94] propose un espace sous deux axes et définit les termes d' *interface augmentée en entrée et en sortie*. Dubois analyse très précisément les différentes approches dans [Dub01], et propose sa propre taxonomie [DNT⁺99] basée sur l'objet de la tâche et le type d'augmentation.

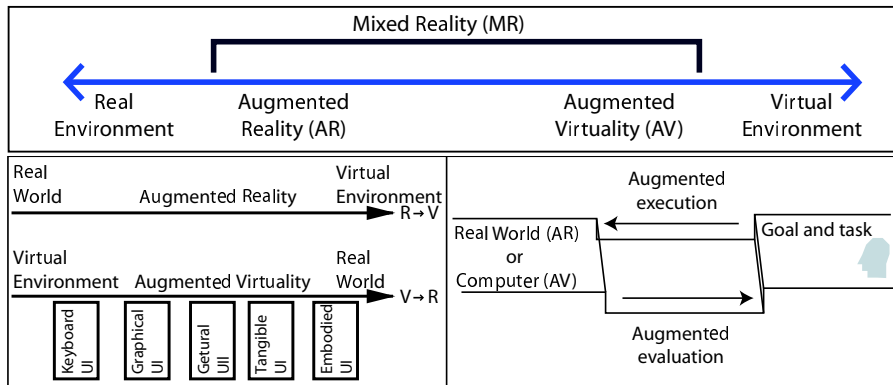


FIG. 3 – Taxonomie : Milgram [MK94] et Dubois [DNT⁺99].

2.3 Notions dérivées

Le terme de réalité augmentée est généralement associé à une multitude de concepts dérivés ou différents. Pour ce faire, on introduit ici quelques termes usuels en identifiant leur relation par rapport à la réalité augmentée :

- Mediated Reality [Man94] : Elle consiste à modifier notre vision de la réalité à partir de dispositifs physiques ou logiciels, la RA devenant un type de filtre d'additif dans ce concept (définition propre à l'auteur qui peut être inversée (la mediated reality devenant une catégorie de RA) ;
- Diminished Reality [MF01] : Consiste à filtrer la réalité, la modifier, et remplacer ou supprimer (visuellement) des éléments réels par des éléments virtuels ;
- Artificial Reality [KGH85] : introduit par Krueger, il le définit comme un monde virtuel, dans lequel un utilisateur peut interagir si naturellement qu'elle lui procure une sensation d'immersion : la différence avec la RV s'inscrivant dans l'usage des techniques vidéos, remplaçant l'encombrement de dispositifs physiques par une interface gestuelle et corporelle ;
- Amplifying reality [FRB99] : Définit le fait d'augmenter les propriétés publiques des objets réels, par des ressources informatiques embarquées à l'objet (complémentaire de la réalité augmentée) ;
- Ubiquitous Computing [Wei91] : Présenté par Weiser, c'est une vision dans laquelle l'informatique est transparente dans notre environnement accessible partout et en tout lieu : à l'aide de multiples périphériques chacune avec un positionnement et une conception adaptée à une ou plusieurs tâches (l'ordinateur disparaissant *disappearing computer*) ;
- Pervasive Computing [Sat01] : Généralement associé au terme précédent, il définit une accessibilité à tous éléments numériques sous n'importe quelle forme (telle qu'un assistant digital personnel ou un téléphone) ;
- Tangible User Interface (TUI) [IU97] : utilisation d'élément réel pour l'interaction avec des éléments virtuels/numériques. Notions assimilables : grasable user interface [FIB95], ou natural user interface [RS96].

3 Architecture

De façon similaire à la RV, il n'existe aujourd'hui pas de méthodologie de mise en oeuvre d'un environnement de RA. On pourra se baser sur une approche centrée utilisateur, la notation ASUR++ [DGN02] ou des premiers concepts de conceptions identifiés dans [arg]. De notre point de vue, les travaux de [GG02] nous ont conduit à définir une première décomposition en tâches, définissant différentes classes de problématique. On s'appuie individuellement sur chacune des composantes identifiées pour les présenter maintenant en détails. On introduit tous d'abord les architectures matérielles, qui sera suivi des architectures logicielles.

3.1 Hardware

On présentera en premier lieu les solutions matérielles actuellement mise en oeuvre, puis les nouvelles technologies émergentes.

3.1.1 Approche classique

Pour la visualisation du virtuel, on utilise des dispositifs d'affichages dédiés qui permettent alors de mixer réel et virtuel. On peut distinguer différentes classes de système :

- les affichages de types casques (HMD) : le système est couplé à la tête de l'utilisateur et ils se distinguent en deux catégories. Les casques dit semi-transparent optique (*optical see-through HMD*), constitue d'un écran LCD couplé à un miroir semi-transparent dont le mixage réel et virtuel est fait par l'oeil de l'utilisateur [Sut65]. Puis, on a les casques dit semi-transparent vidéo (*vidéo see-through HMD*) dont le mixage est fait entre un rendu graphique et l'image provenant d'une camera, ce mélange étant alors présenté à l'utilisateur [EKEK93] ;
- les affichages de type écran : la visualisation est faite à travers un écran (optionnellement suivi), à l'aide d'une caméra couplée à cet élément qui peut être : écran de bureau [ABC⁺94], d'ordinateur de portables [SMW⁺02], un écran portable à la main [RN95] [MKBP02] ou une solution mixte [BKP01] ;
- les affichages par projection : la visualisation est faite sur une surface du monde réel, la projection pouvant être sur une table [RFK⁺97], un mur [Rek] ou sur une surface quelconque [RR99],[PRI02a], [Pin01].

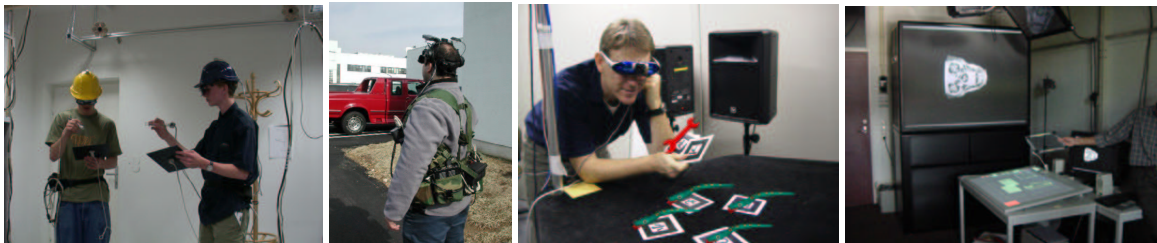


FIG. 4 – Configurations et différents dispositifs de RA : classique [SFH00], mobile [Jul00], bureau [MP02], publique [AMS⁺01].

Pour l'interaction, on utilise la variété des capteurs provenant du monde de la Réalité Virtuelle (magnétique, ultrasons, optique, inertiel), mais aussi des dispositifs plus légers (RFID, capacitif, pression). Divers travaux ont introduits des nouveaux capteurs supportant des zones d'échanges plus grandes [FHP98], [WBV⁺01]. Une autre solution peut être un suivi par vision qui offre alors une approche robuste et précise pour la réalité augmentée, basée sur des algorithmes dédiés au temps réel [Kli97], [KB99]. Comme nous le verrons au chapitre suivant, ce type d'approche peut être couplé avec une technologie plus rapide, une complémentarité qui offre alors un système de haute qualité ([SLH⁺96]).

La solution idéale reste aujourd'hui largement à définir. Rolland a étudié la différence entre casque semi-transparent optique et vidéo [RHF94] et montre qu'aucune technologie n'est actuellement meilleure, sur des critères technologiques et ergonomiques, chacun ayant leurs propres avantages. L'optique offre une véritable vue du réel (résolution, vue périphérique, alignement oeil-image, instantanée), meilleure acceptation de l'utilisateur. L'approche vidéo offre un alignement de meilleure qualité (mais un conflit sensoriel entre vision et proprioception), et une meilleure gestion des occultations, contrôle total de la vision de l'utilisateur. Tandis que Azuma dans

[Azu93] définit trois besoins pour les systèmes de suivi pour la RA : haute précision, peu de latence et large plage de suivi.

3.1.2 Technologies émergentes

On présente aussi ici un certains nombres de nouveaux dispositifs reposant sur des progrès techniques ou des adaptations dédiées à la RA.

Hua introduit un prototype de casque à affichage projectif dans un cadre de RA [HGB⁺02], [HGBR02]. L'approche consiste à utiliser des surfaces rétro-réfléchissantes, offrant une solution à fort angle de vue, gérant automatiquement les occultations, et peu de distorsion optique. Kiyokawa propose quant à lui un nouveau type de casque optique semi-transparent gérant aussi les occultations base sur l'adjonction d'un panneau de LCD positionné dans le prolongement de l'écran optique associé à un ensemble de caméras permettant de reconstruire une carte de profondeur [KK01b], [KK01a],[KBCW03].

La taille et l'inconfort du casque constituent un point très limitant de l'usage de ce système. Dans ce cadre, différentes solutions alternatives ont vu le jour. D'un point de vue plus ergonomique, Micro-optical a introduit les premiers prototypes de lunettes RA [SZC⁺01], pouvant, suivant les modèles, se fixer sur de véritables lunettes de vue (aux performances encore fortement limitées). Une nouvelle approche est l'utilisation de la projection rétinienne permettant à l'aide d'une technologie laser modulé, de projeter les informations directement au fond de l'oeil [VPNF98].

En complément, de nouvelles solutions d'écrans portables ont été proposées : on peut citer les assistant digital personnel [PW03], [Wag03a] et les tablets PC. Dans un cadre collaboratif, le système Virtual Showcase [BFSE01] reposant sur l'utilisation de la surface de projection d'un Workbench pour restituer un espace de visualisation offre une très bonne solution pour des taches peu interactives telles que des présentations multimédia.



FIG. 5 – Nouveaux types d'affichages : HMPD [HGB⁺02], ELMO [KBCW03], EyeWear [SZC⁺01], et Virtual Showcase [BFSE01].

Pour le suivi 3D, [RPF01] [vLM03] proposent quant à eux des solutions par vision basées sur de caméras stéréoscopiques offrant une solution alternative. On notera pour finir une forte émergence d'architectures matérielles mobiles : MARS [HFT⁺99], Tinmith [PGT99], Archeoguide [DK02], OCAR [RS03].

3.2 Software

La mise en place d'une architecture de RA nécessite une gestion de l'hétérogénéité des périphériques, des procédures de calibrage, de l'alignement, des choix et du contrôle des différents algorithmes de traitement et du contrôle de l'affichage. Différentes approches ont été utilisées :

- développement monolithique : Archeoguide [GD01], [BFKT00], [Wag03b] ;
- développement de bibliothèques dédiées : à la video ([LLR⁺99]), à la vision (ARToolkit [BKWF99]),aux capteurs distribués ([KRB00], [BBK⁺01b], [SY02]) ;
- architectures bas niveau : MR-Platform [UTS⁺02], ImageTclAR [OTX03] ou basé sur des bibliothèques existantes ([DSB⁺03]) ;
- architectures objets : Grasp [ABC⁺94], Tinmith [PT03], Studierstube [SFH⁺02], MARE [GG02], COTERIE [MF96], BEACH [Tan00] ;
- architecture à composants : projet DWARF [BBK⁺01a], Magic meeting, AMIRE [DGHP02] [PHP⁺02], VHD++ [PPM⁺03] ou [GPRR00] ;
- développement sur d'outils "d'autoring" haut niveau : DART [MGB⁺03].

Les bibliothèques supportant alors le mono-utilisateur, le multi-utilisateur co-localisé [MSW⁺03], [GG02], distribué [HSFP99], [SRH02], ou fortement distribué [BJB03].

D'un point de vue du contenu applicatif (modèles 3D, images, sons ou vidéos) il peut alors être décrit sous forme standard (soupe de polygones, graphe de scène), mais aussi sous forme de contenu descriptif par des modules de haut niveau telle que dans [NM98], [FPTP01], [HPF99], [LS03]. Quelques récents travaux s'intéressent à la définition de méthodologie de réalisation d'architecture RA telle que [RMBK03] (défini un certains nombres de recommandations), [RMB03] (patterns de RA) ou [BHM⁺03] (analyse).

4 Mixage

Le mixage est défini ici comme l'intégration d'un point de vue visuel entre monde réel et monde virtuel. Il faut d'une part que les objets virtuels soient être alignés avec le monde réel (ou des objets réels) et conservent cette position dans le repère de visualisation de l'utilisateur (nommé *registration*), et d'autre part que les relations de visibilité et les échanges lumineux soient aussi pris en compte.

La résolution de ces problèmes reste très complexe et constitue un des principaux verrous de la RA. Le problème d'alignement a été très étudié par Holloway et Azuma [Hol95b], [Hol95a], [Azu93], [Azu97] et une étude spécifique à été réalisé sur l'erreur d'alignement des casques dans [HV00]. Azuma définit deux types d'erreurs [Azu97] : erreur statique (mauvais alignement en l'absence de déplacement de l'utilisateur ou des objets) et l'erreur dynamique (mauvais alignement lors d'un déplacement de l'utilisateur ou des objets).

4.1 Alignement spatial : traitement de l'erreur statique

Holloway définit quatre types d'erreur statique : distorsion optique, erreur du système de suivi, mauvais alignement mécanique, mauvaise estimation des paramètres (champ de vue, distance oeil-capteur, distance interpupillaire ..etc..) . La distorsion optique est un problème bien connu déjà introduit par [RR92].

L'erreur du système de suivi a été étudiée dans le cadre de capteurs électromagnétiques (sensibles aux distorsions du champ magnétique [NMF⁺98]). Plusieurs solutions existent telles que par des tables de corrections ([Bry92], [CAS⁺95], [LS97]), des fonctions polynomiales globales de corrections ([Zac97], [Kin99], [KB00], [IBHH01]). D'autres travaux se sont intéressés à l'alignement dans un cadre de système de type Workbench, pour l'alignement des outils d'interaction, telle qu'un bras à retour d'effort [IHJ03].

La mauvaise estimation des paramètres a été l'erreur la plus étudiée en réalité augmentée. Une estimation fiable nécessite de mettre en oeuvre des méthodes robustes basées sur une définition de contraintes, nommée procédure de calibration (*calibration* [TGW⁺95b]). A partir d'une modélisation du système, on s'intéresse alors au calibrage de ces différentes parties (évalué sur des critères tels que définis [HW96]). On peut alors utiliser des méthodes automatiques (par vision, auto calibrage [GH93]) ou des méthodes basées utilisateurs (de [AB94] à des solutions simples et efficaces telles que [GDG01]). On peut classer les méthodes part type d'éléments calibrés :

- calibrage de casques ou écrans : video ([TGW⁺95a]), optique ([AB94], [OT96], [FSP99]) [MT99], [TN00b], [TN00a], [GTN01], [GTN02], [GDG01]), HMPD ([GHA03]) ;
- calibrage de pointeur : [TGW⁺95a], [FPTP01] ;
- calibrage d'objets : [WCB⁺95], [FSP99], [SBC⁺99], [GDG01] ;
- calibrage de système de projection : [FPTP01], [CSD98],[SBC⁺99].

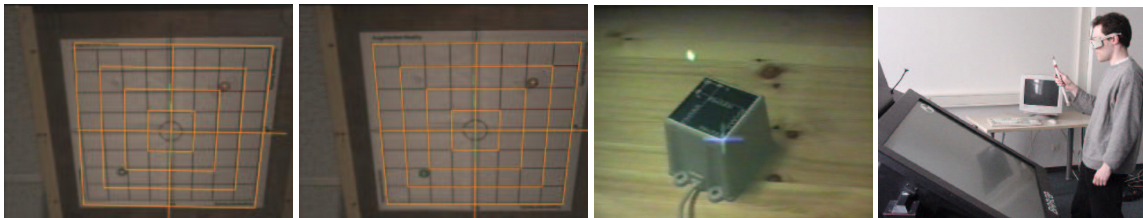


FIG. 6 – Différents processus du calibrage : magnétique [LS97], SPAAM [TN00b], Fuhrmann [FPTP01].

La modélisation de l'erreur statique a été réalisées dans [Hol95b]. Récemment, [mT⁺01] introduit une méthode pour casque optique consistant à identifier des points sur un plan 2D, une métrique permettant de mesurer alors l'erreur. [TZO03] effectue une comparaison de différentes méthodes de calibrage et montre l'efficacité de l'utilisation de la relation main-oeil favorable à des méthodes base sur un déplacement unique de la tête.

4.2 Alignement temporel : traitement de l'erreur dynamique

En pratique, l'erreur principale provient du temps de latence, temps de retard qui définit dans notre cadre le temps pris par le système entre la mesure d'un capteur et le retour visuel pour l'utilisateur (contributions d'une succession de retards, voir [Min93]). Il existe plusieurs méthodes pour réduire cette latence :

- réduire la latence du système : [OCMB95], [PJ01] ;
- réduire la latence apparente : basé sur des approches de déflexions d'images ;
- faire correspondre les flux temporels : [JLS97] propose une méthodologie pour ordonner et gérer différent flux ;
- faire une prédiction : on utilise des algorithmes de prédiction tels que par des filtres de Grey ([WO94]), de Kalman ([Azu95], [AB95], [LSG91]). L'étude de la restriction des mouvements possibles utilisés lors d'une tâche permettrait alors de définir un modèle plus approprié pour les méthodes prédictives (début de travaux de [SL92]) ;

Différents travaux ont cherché à estimer cette latence avec des techniques de mesures telle que [LSG91] (pendule), [HLD⁺00] (à partir de vidéo), [SDB00] (table phonographique).

[BN95] introduit le concept de boucle fermée consistant à corriger l'erreur à partir de l'image finale produite et basée sur un certain nombre de critères (s'opposant au principe de boucle ouverte sans contrôle). Ce concept conduit fortement à l'utilisation de système vision hybride qui compense l'erreur d'un capteur à partir de technique de vision sur l'image.

Différentes approches ont été proposées pour faire du suivi robuste et en temps réel par des méthodes de vision [KKR⁺97]. La première approche consiste en des techniques de suivi de marqueurs, éléments géométriques positionnés dans l'environnement et repères par les spécificités de leur apparence : on retiendra patterns de couleurs ([SLH⁺96], [CN98], [SSN01]) et noir et blanc ([RA00], [NC96], [KKR⁺97], [KB99], [Mal02b], [MJS98]). Quelques travaux ont évalué les performances et spécificités de chaque solution : [CPN97].

Une autre approche repose sur le principe de *template matching* consistant à la mise en correspondantes d'informations d'apparence avec un mode numérique [Kat02]. Kutulakos introduit une approche simplifiant les procédures de calibrage mais ne permet pas de travailler dans un modèle euclidien [KV98].

Une approche hybride avec un suivi par vision (lent) et un capteur (rapide mais peu précis) reste sans doute une des meilleures solutions, voir les travaux de [SLH⁺96], [AT98]. De plus la non-fiabilité des techniques de vision peut alors nécessiter la conservation d'un contrôle utilisateur. Ces approches se limitent alors aujourd'hui fortement à des objets réels suivis dans un repère local, ne fournissant aucune information ni sur les membres des utilisateurs, ni dans un repère global.

Une généralisation des techniques n'étant pas applicable en extérieur, dans ce cadre des approches hybrides [YNA99] ou du suivi par marqueurs naturels offrent de bonnes solutions [NY99], [GTN02]. Des approches avec du suivi planaire, ou basé objet offrent de très bonnes performances ([GSZ00], [SB02], [PCF⁺02], [BKT⁺01], [LVF03]). Quant à [CMC03] [MBCM99] il ramène la problématique à un asservissement visuel.

4.3 Photoréalisme

On considère ici deux classes de problèmes : les occultations (gestion de la profondeur et superposition des objets du point de vue de l'utilisateur) et cohérence d'éclairage (même modèle d'éclairage pour le réel et virtuel, avec gestion des ombres).

Pour les occultations, la résolution des quatre cas de base (R/R,R/V,V/R,R/V) peut être résolue par différentes techniques : reconstruction dense de l'environnement ([BWRT96], [WA95], [SNV02]), estimation de la profondeur par vision stéréoscopique et utilisation de billboard [KOTY99], utilisation d'objet "phantom" [FHFG99] , ou une approche base vision par étude sur les contours [Ber97].

De nombreux travaux ont été menés concernant l'incrustation d'objets virtuels dans une image par des tech-

niques non temps réel¹ ([Fou94], [SSI99], [Deb98], [sta99], [GM00], [LDR00],). Récemment plusieurs travaux se sont intéressés à des solutions temps réel simplifiés : estimation de direction [ADK⁺01] [WJM⁺03], estimation par lightprobe [hRfARUEI03], estimation et éclairage basé image [KY02], re-éclairage du modèle initiale avant intégration [MOO02], [MW01], shadow volumes [MSWJ03], shadow mapping [oSRoVOiAR03], modification par projection [RLW01], système automatique pour Virtual Showcases [BES03]. Dans ce contexte, Sugano a étudié la relation R/V par rapport à la notion d'ombres et montre que la direction de l'ombre est l'information dominante dans un cas de scènes statiques et que dans des scènes dynamiques seule la forme globale est un paramètre important.

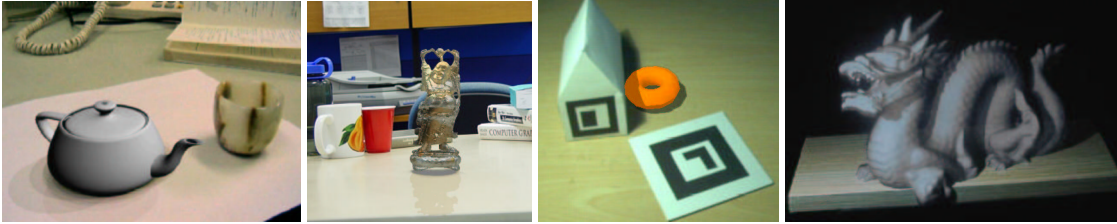


FIG. 7 – Rendu photorealiste temps réel : estimation par light probe [KY02], éclairage basé image [KY02], shadow volumes [MSWJ03] , et éclairage en solution optique [BES03].

5 Interaction

Une large part des méthodes s'est développée dans la continuité des systèmes de réalité virtuelle ou des métaphores bureau que l'on divise ici en deux catégories. D'une part, la définition de métaphores reprenant les tâches de base de l'interaction 3D (sélection, manipulation, navigation, contrôle d'application [Bow99]), d'autre part les environnements de haut niveau gérant une interface hybride multi-utilisateurs, multi-périphériques et multi-documents. nous verrons enfin quelques travaux sur l'ergonomie de ces interactions.

5.1 Tâches de base

[zAR02] définit différents types d'interactions sous quatre formes : navigation 3D, navigation 2D, manipulation 3D, manipulation 2D. Dans notre cas, on reprend la classification de Bowman.

Manipulation

On distingue différentes approches :

- techniques classiques de bureau ou de RV : pointeur 3D [SFSG96], rayon 3D [SPVT01], plan 3D [Rek96], palette [SG97], manette 3D [BHF⁺99], interface laser [Rek] ;
- interaction digitale, gestuelle : avec gants [TP02] , 2D [CC95] [NSK01], 2D dans un plan spécifique [Mal02a], avec marqueurs [DUS01], avec marqueurs 2D [VKL⁺02] [DSB⁺03], mobile [KOKS01], real reality [BB96]. On peut aussi citer les approches sur les tables digitales ([Rek02]) et les techniques associés ([MW03]) ;
- interfaces saisissables, TUI : par capteur magnétique ([FIB95], [PIHP01], [BJB03]), par vision [IU97] [RFK⁺97], avec un paddle [KIK⁺01], avec des marqueurs ([RW02], [DMS⁺02]), par jetons [Bér03], magicCup [KTT⁺03], par marqueurs et relations de proximités [PTB⁺02] ;
- avec des approches multimodales : fusion (Rasa [MCW00]), ou basé sur une approche stochastique (SenseShape [OBF03]).

Navigation

On distingue les travaux liés à la gestion de la caméra, et les interfaces transitoires Réel/RA/RV.

¹généralement définie par les auteurs comme approche de réalité augmentée, en incohérence avec la définition de Azuma

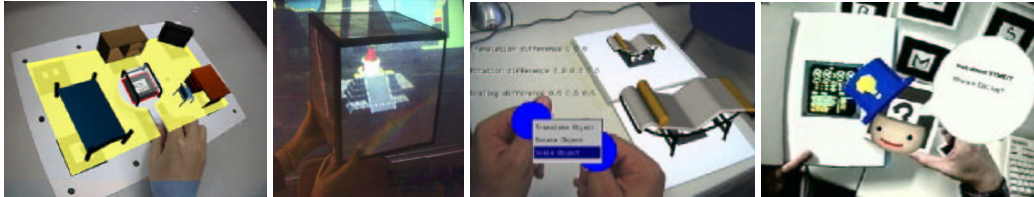


FIG. 8 – Différentes méthodes de manipulations 3D : paddle [KIK⁺01], CoCube [BJB03], gestuelle [DSB⁺03] ou tangible [PTB⁺02]

Fjeld s'intéresse au déplacement du point de vue et propose différentes méthodes tangibles dans le cadre de deux vues publiques projetées [FIV⁺99], [FVB⁺99]. Aliakseyeu s'intéresse à la navigation sous formes de coupes dans un espace 3D et propose une approche tangible [zAR02]. [HBGA03] propose une gestion simultanée d'une vue égocentrique et exocentrique, la relation dépendant du déplacement d'un avatar tangible (dérivé du WIM [SCP95], aussi repris par [SG97]).

[KK99] introduit la possibilité de passer d'un mode RA à RV à l'aide d'un slider virtuel. [BCH⁺00] étend ce concept et décrit une interface de transition, MagicBook, permettant de passer de Réel, à RA, à RV.

Contrôle d'applications

[RFK⁺97] propose une projection des outils partagés sur la surface commune. Schmalstieg propose l'utilisation du PIP [SG97], palette physique associée à des interface graphiques virtuels d'une application alors que [GF01] introduit un couplage de Widget à des éléments physiques interaction.

Modélisation

[PT03] introduit des techniques interactives pour reconstruire des scènes extérieures réelles, tandis que [LHS01] ajoute des objets réels par digitalisation interactive (ou d'autres approches par vision [DC03] ou par approche générique[GDG01]). [BRF01] s'intéresse à des techniques pour modifier dynamiquement l'apparence d'objets réels, créer une perception d'animation [RZW02] modifier l'apparence d'objets réels par affichage par projection, [RZW02], ou [GGS03] avec un système interactif qui permet 'd'alterner' la réalité.

5.2 Environnement de haut niveau

Différents projets se sont intéressés à fournir des interfaces de plus haut niveau pour manipuler un ensemble d'éléments regroupables sous forme de documents ou de fenêtres [Mye88]. [FMS93] introduit ce concept et propose le placement de fenêtres virtuelles dans un espace réel. [SFH00] reprend les principes des interfaces de bureau et introduit un système d'événements et de fenêtre 3D, de contexte de données, et de système de référence. [RUO01] propose une interaction sous forme de tuiles physiques interconnectables physiquement associées à des éléments virtuels projetés. [RBW01] reprend le concept des fenêtres 2D, qu'il intègre alors au réel associé à des marqueurs rigides réels (ainsi que [GOR03], [DNH03] et [RR01]).

[BHF⁺99] introduit le terme d'interface utilisateur hybride : elle définit un support pour de multiples utilisateurs, périphériques, systèmes dans un cadre hétérogène. Il s'intéresse alors à la gestion de cette interface en proposant des méthodes de gestion du contenu visible, du filtrage des données affichées : [HFH⁺01], [BFH01]. A un plus fort niveau communicatif, Broll décrit dans [BSHB01], la RA comme peut-être une interface adéquate pour l'interaction avec un système supportant des agents de communication ([KYT00] propose par exemple, Welbo un simple agent conversationnel).

5.3 Etude des facteurs ergonomiques

Etude des facteurs de perception : [LW02] montre que les casques semi-transparents sont peu utilisables pour des environnements très dynamiques, mais plus utilisable que des technologies optiques si la mise à jour du fond est à faible fréquence. Drascic dans [DM91] [DM96] s'est largement intéressé à la problématique de pointage virtuel avec un système de RA vidéo et montre que l'accommodation, la vergence entre les deux mondes reste un problème très difficile à résoudre. [Hou01] montre que la position d'un pointeur virtuel et le type de texture d'un objet réel pointe influe sur leurs performances de sélection de points de cet objet, le signal de binocularité diminuant nettement cette erreur (base sur un système AR vidéo stéréoscopique base écran).

Etude des facteurs des mouvements : [MWLM01] montre l'importance du retour visuel des membres en interaction et retour tactile de l'élément manipulé. Elle montre aussi que l'analyse des variables cinématiques d'un mouvement peut alors fournir une très bonne source pour les algorithmes de prédiction. Shaw [SL92] a étudié lui aussi le mouvement pour une tâche de base, montrant un mouvement de déplacement sur un grand arc de cercle.

Etude de tâches : Tang étudie des tâches d'assemblages en RA, et montre dans [TZO03], [TOBM02] l'efficacité réduisant l'erreur de 82% de la tâche par rapport à des approches base moniteur ou manuel. [FSSK00] montre l'efficacité d'une interface saisissable par rapport à des approches purement virtuelles.

6 Cas Particulier : collaboratif

Le collaboratif peut être défini dans la taxonomie de [EGR91] basé sur un classement à deux dimensions, un axe de temps (synchrone/asynchrone) et un axe d'espace (local/distant). Dans ce cadre, les travaux de réalité augmentée se sont principalement tournés vers les systèmes distants synchrones ou les systèmes face-à-face, c'est à dire co-localisé synchrone. Un grand nombre de travaux lié à l'ubiquitous computing et au travail sur le collaboratif peuvent alors servir pour guider de nouvelles approches. On peut citer des travaux lié à l'approche co-localisés ([Sco03],[SGM03],[GG00]).

Schmalstieg [SFSG96] définit les cinq composantes clés d'un environnement collaboratif de RA :

- la virtualité : les objets sans existence réelle peuvent être vus et examinés dans le monde réel ;
- l'augmentation : les objets réels peuvent être augmentés avec des annotations virtuelles ;
- la coopération : plusieurs utilisateurs peuvent se voir l'un l'autre et coopérer de façon très naturelle ;
- l'indépendance : chaque utilisateur peut contrôler son propre point de vue ;
- l'individualité : l'information peut apparaître sous différentes formes choisies par l'utilisateur.

Au-delà de ces concepts, différents travaux ont évalué l'aspect collaboratif et ces propriétés perceptuelles et ergonomiques. Kiyokawa [KINY98] montre que les interfaces de type RA sont plus favorables à la collaboration que les interfaces de RV, qui sont plus propices à la navigation immersive et montre l'importance du retour visuel du point de vue des autres utilisateurs (meilleurs résultats sous forme de ligne de vue). Bilinghurst montre dans [BCKP02] que les interfaces RA collaborative (tangible) sont plus similaires à la collaboration face à face réelle que par un système projectif (on peut noter que d'après ces résultats des casques à plus fort champ de vue réduit notablement cet écart de performance).

Environnements existants

On liste pour finir les différents environnements² de RA existants en proposant un classement selon des critères qui restent malheureusement perméables :

- environnement Ubiquitous Computing : Ambiente [STMTK01], Interactive Workspace [BRTF02], interactive design collaborium [GGMr01], SDG [SBD99] ;
- environnement de RV (restreint à quelques exemples ici pour comparaison) :
 - environnement de type semi-immersif 3D co-localisé : PIT [APT⁺98], Responsive Workbench [ABM⁺97],
 - environnement de type semi-immersif 3D distribué : Spin-3D [DDS⁺98], CALVACADE [TBG⁺99], [GPMV00] ;
- environnement de RA :
 - environnement de type 2D co-localisé : BUILD-IT [RFK⁺97], VIP [AMS⁺01], TILES [PTB⁺02],

²on considère un environnement comme le support des quatre types de composantes définies précédemment (architecture, mixage, interaction et collaboration) et la possibilité pour le système de s'adapter à une nouvelle application.

- environnement de type 3D distant : téléconférence [RWC⁺98], MR conférence [BKWF99], [BFSK03],
- environnement de type 3D co-localisé : Shared Space [BWF98], Magic Book [BCH⁺00], V-LEGO [KTK⁺96], Studierstube [SFH⁺02], SCAPE [HBGA03] ,
- environnement de type 3D co-localisé sur table : EMMIE [BHF⁺99], ARTHUR [GMS⁺03], MARE [GG02], Magic Meeting [RW02].



FIG. 9 – Quelques environnements collaboratifs : BUILD-IT [Rek], Tiles [PTB⁺02], MARE [GG02].

7 Conclusion

Le domaine récent de la réalité augmentée fait preuve d'un grand nombre de travaux, son approche multidisciplinaire convergeant vers un environnement unifiant les différents travaux de bout en bout. L'utilisation de système mobile offre maintenant une unique non réalisable avec la RV.

Une large part des limitations reste aujourd'hui les limitations technologiques (périphériques, hardware) qui nécessite un grand bond en avant pour passer à des solutions industriels. Les techniques d'alignement doivent aussi progresser, la vision semblant ouvrir une nouvelle voie d'utilisation pour combler erreur statique et dynamique. Un grand nombre d'expérimentations sur les facteurs humains et des études perceptuelles, physiologique, sont nécessaire, comme on continue à le réaliser aujourd'hui dans la Réalité Virtuelle, pour comprendre et cerner les critères perceptuels et ergonomiques limitations et possibilités de la RA (base sur une nouvelle méthodologie centre utilisateur dédié à la RA [GHS99], [DGN02]).

Pour conclure, la montée du pervasive computing associé à la réalité augmentée conduisent à tendre vers une nouvelle conception des relations homme-machine ("anywhere, anytime"), dont la forte réduction des coûts matériels est un facteur clé : Il y'a une dizaine d'années, il était nécessaire d'avoir des budgets de l'ordre du million d'euros (salle climatisé, stations hautes performances, périphériques lourds) alors que maintenant il y'a juste besoin d'une dizaine de milliers d'euros (ordinateur portable, périphériques léger), facilitant une accessibilité et une mise en oeuvre en tous lieu (musée, environnement industriel, extérieur).

L'utilisateur pourra trouver plus d'informations sur une page regroupant un accès vers la liste complète des références, les publications en ligne, bibliographie à jour, complément multimédia à l'adresse suivante :

<http://www-artis.imag.fr/Members/Raphael.Grasset/AR/>

Références

- [AB94] Ronald Azuma and Gary Bishop. Improving static and dynamic registration in an optical see-through hmd. In *SIGGRAPH*, pages 197–204, 1994.
- [AB95] Ronald Azuma and Gary Bishop. A frequency-domain analysis of head-motion prediction. In *SIGGRAPH*, Los Angeles, USA, August 1995.
- [ABB⁺01] Ronald Azuma, Yohan Baillot, Reinhold Behringer, Steven Feiner, Simon Julier, and Blair MacIntyre. Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6) :34–47, November/December 2001.
- [Azu95] Ronald Azuma. *Predictive Tracking for Augmented Reality*. PhD thesis, UNC Chapel Hill Dept. of Computer Science, 1995.

- [Azu97] Ronald T Azuma. A survey of augmented reality. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 1997.
- [BBK⁺01a] Martin Bauer, Bernd Bruegge, Gudrun Klinker, Asa MacWilliams, Thomas Reicher, Stefan Riss, Christian Sandor, and Martin Wagner. Design of a component-based augmented reality framework. In *International Symposium on Augmented Reality (ISAR)*, 2001.
- [BCKP02] Mark Billinghurst, A. Cheok, H. Kato, and S. Prince. Real world teleconferencing. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2002.
- [BFH01] Blaine Bell, Steven Feiner, and Tobias Höllerer. View management for virtual and augmented reality. In *Symposium on User Interface Software and Technology (UIST)*, 2001.
- [BFO92] M. Bajura, H. Fuchs, and R. Ohbuchi. Merging virtual objects with the real world : seeing ultrasound imagery within the patient. In *SIGGRAPH*, pages 203–210. ACM, 1992.
- [BHF⁺99] A. Butz, T. Hollerer, S. Feiner, B. MacIntyre, and C. Beshers. Enveloping users and computers in a collaborative 3d augmented reality. In *International Workshop on Augmented Reality (IWAR)*, 1999.
- [BKP01] M. Billinghurst, H. Kato, and I. Poupyrev. The magicbook : Moving seamlessly between reality and virtuality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, pages 2–4, 2001.
- [BN95] Michael Bajura and Ulrich Neumann. Dynamic registration correction in video-based augmented reality systems. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1995.
- [BRF01] Deepak Bandyopadhyay, Ramesh Raskar, and Henry Fuchs. Dynamic shader lamps : Painting on real objects. In *International Symposium on Augmented Reality (ISAR)*, October 2001.
- [DM96] David Drascic and Paul Milgram. Perceptual issues in augmented reality. In *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III*, volume 2653, pages 123–124. SPIE, January 1996.
- [Dub01] Emmanuel Dubois. *Chirurgie Augmentée : un Cas de Réalité Augmentée ; Conception et Réalisation Centrée sur l'Utilisateur*. PhD thesis, Joseph Fourier University, Grenoble, 2001.
- [FHFG99] A. Fuhrmann, G. Hesina, F. Faure, and Michael Gervautz. Occlusion in collaborative augmented environment. In *Eurographics Workshop on Virtual Environment (EGVE)*, 1999.
- [FIB95] George W. Fitzmaurice, Hiroshi Ishii, and William Buxton. Bricks : Laying the foundations for graspable user interfaces. In *Computer Human Interaction (CHI)*, pages 442–449, 1995.
- [FMS93] Steve Feiner, Blair MacIntyre, and D. Seligman. Knowledge-based augmented reality. *Communications of the ACM*, 36(7) :52–62, July 1993.
- [Fou94] Alain Fournier. Illumination problems in computer augmented reality. TR 95-35, Department of Computer Science at the University of British Columbia, 1994.
- [Hol95b] Richard Holloway. *Registration errors in augmented reality systems*. PhD thesis, University of North Carolina at Chapel Hill, 1995.
- [IU97] H. Ishii and B Ullmer. Tangible bits : Towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Computer Human Interaction (CHI)*, pages 234–241, March 1997.
- [JLS97] Marco C. Jacobs, Mark A. Livingston, and Andrei State. Managing latency in complex augmented reality systems. In *Symposium on Interactive 3D Graphics (I3D)*, pages 49–54, 185, 1997.
- [KB99] Hirokazu Kato and Mark Bilinghurst. Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In *International Workshop on Augmented Reality (IWAR)*, San Francisco, USA, October 1999. IEEE and ACM.
- [KBP⁺00] H. Kato, M. Billinghurst, I. Poupyrev, K. Imamoto, and K. Tachibana. Virtual object manipulation on a table-top ar environment. In *International Symposium on Augmented Reality (ISAR)*, 2000.
- [Kli97] G. Klinker. Confluence of computer vision and interactive graphics for augmented reality. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 433-451 1997.
- [LS97] Mark Livingston and Andrei State. Magnetic tracker calibration for improved augmented reality registration. *Presence*, 6(5) :532–546, October 1997.
- [LVF03] V. Lepetit, L. Vacchetti, , and P. Fua. Fully automated and stable registration for augmented reality applications. In *International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, Tokyo, Japan, Septetmber 2003.

- [Man94] Steve Mann. Mediated reality. TR 260, M.I.T. Media Lab Perceptual Computing Section, 1994.
- [MK94] P. Milgram and F. Kishino. A taxonomy of mixed reality visual displays. In *IEICE Transactions on Information and Systems (Special Issue on Networked Reality)*, number E77-D(12) :1321-1329, December 1994.
- [NY99] Ulrich Neumann and Suya You. Natural feature tracking for augmented reality. *IEEE Transactions on Multimedia*, 1(1) :53–64, 1999.
- [PTB⁺02] Ivan Poupyrev, Desney S. Tan, Mark Billinghurst, Hirokazu Kato, Holger Regenbrecht, and Tetsutani. Developing a generic augmented-reality interface. *IEEE Computer*, 35(3) :44–50, 2002.
- [RFK⁺97] M. Rauterberg, M. Fjeld, H. Krueger, M. Bichsel, U. Leonhardt, and M. Meier. Build-it : a video-based interaction technique of a planning tool for construction and design. In *Work With Display Units (WWDU)*, pages 175–176, 1997.
- [RHF94] Janick P. Rolland, Richard Holloway, and Henry Fuchs. A comparison of optical and video see-through head-mounted displays. In *SPIE Telemanipulator and Telepresence Technologies*, volume 2351, Boston, USA, October 1994.
- [RN95] Jun Rekimoto and Katashi Nagao. The world through the computer : Computer augmented interaction with real world environments. In *Symposium on User Interface Software and Technology (UIST)*, pages 29–36, 1995.
- [RUO01] Jun Rekimoto, Brygg Ullmer, and Haruo Oba. Datatiles : a modular platform for mixed physical and graphical interactions. In *Computer Human Interaction (CHI)*, pages 269–276, 2001.
- [SFH00] D. Schmalstieg, A. Fuhrmann, and G. Hesina. Bridging multiple user interface dimensions with augmented reality. In *International Symposium on Augmented Reality (ISAR)*, Munich, Germany, October 2000.
- [SFH⁺02] Dieter Schmalstieg, Anton Fuhrmann, Gerd Hesina, Zsolt Szalavari, L. Miguel Encarnação, Michael Gervautz, and Werner Purgathofer. The studierstube augmented reality project. *Presence - Teleoperators and Virtual Environments*, 11(1) :33–54, February 2002.
- [SG97] Zsolt Szalavári and Michael Gervautz. The personal interaction panel — A two-handed interface for augmented reality. *Computer Graphics Forum*, 16(3) :C335–C346, 1997.
- [SLH⁺96] Andrei State, Mark A. Livingston, Gentaro Hirota, William F. Garrett, Mary C. Whitton, Henry Fuchs, and Etta D. Pisano (MD). Technologies for augmented-reality systems : realizing ultrasound-guided needle biopsies. In *SIGGRAPH*, pages 439–446, New Orleans, USA, August 1996. ACM.
- [Sut68] Yvan E. Sutherland. A head-mounted three-dimensional display. In *AFIPS Conference*, volume 33, pages 757–764, 1968.
- [TGW⁺95a] Mihran Tuceryan, Douglas S Greer, Ross T. Whitaker, David Breen, Eric Rose, Chris Crampton, and Klaus H. Ahlers. Calibration requirements and procedures for a monitor-based augmented reality system. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1(3) :255–273, September 1995.
- [TN00b] Mihran Tuceryan and Nassir Navab. Single point active alignment method (spaam) for optical see-through hmd calibration for ar. In *International Symposium on Augmented Reality (ISAR)*, pages 149–158, Munich, Germany, October 2000.
- [WA95] Matthias M. Wloka and Brian G. Anderson. Resolving occlusion in augmented reality. In *Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 5–12, 1995.
- [Wei91] Mark Weiser. The computer for the twenty-first century. *Scientific American*, 1991.
- [Wel91] Pierre Wellner. The digitaldesk calculator : tangible manipulation on a desktop display. In *Symposium on User Interface Software and Technology (UIST)*, pages 27–33. ACM Press, 1991.
- [WFM⁺96] A. Webster, Steve Feiner, Blair MacIntyre, W. Massie, and T. Krueger. Augmented reality in architectural construction, inspection and renovation. In *Congress on Computing in Civil Engineering*, pages 913–919, Anaheim, USA, June 1996. ASCE.