

les caméras accidentelles et celle tout aussi décisive d'un groupe distinct du MIT dirigé par Ramesh Raskar, nous y reviendrons. En 2016, séduite par ces résultats, l'Agence américaine pour les projets de recherche avancée de défense (Darpa) a lancé un programme de 27 millions de dollars, nommé Reveal (pour « Revolutionary Enhancement of Visibility by Exploiting Active Light-fields »), visant à financer dans tout le pays un certain nombre de laboratoires s'intéressant à ce domaine naissant. Depuis, de nouvelles idées et astuces mathématiques ont rendu l'imagerie hors ligne de visée encore plus efficace.

Outre des applications militaires et d'espionnage évidentes, les chercheurs envisagent des utilisations dans les voitures autonomes, la vision des robots, l'imagerie médicale, l'astronomie, l'exploration spatiale et les missions de recherche et sauvetage.

L'INTERPRÉTATION DES OMBRES

Cependant, Antonio Torralba et Bill Freeman ne pensaient pas à ces répercussions pratiques. Ils ne s'intéressaient qu'aux principes de la formation d'une image et au fonctionnement d'une caméra. Ces questions les ont naturellement conduits à une enquête plus complète sur le comportement de la lumière et sur ses interactions avec des objets dans notre environnement. C'est alors qu'ils ont commencé à voir des choses que personne n'avait pensé à chercher. D'ailleurs, rappelle Antonio Torralba, des études psychologiques ont montré « que les humains sont vraiment mauvais

— En bref —

> Même cachée, une scène se trahit par des reflets, des ombres... que des caméras peuvent capter.

> L'analyse par ordinateur de ces signaux reconstruit une image et renseigne ce qui était invisible.

> Encore à leurs balbutiements, ces techniques prometteuses sont en progrès constants.

> Elles équiperont un jour les véhicules autonomes et trouveront des applications en astronomie.

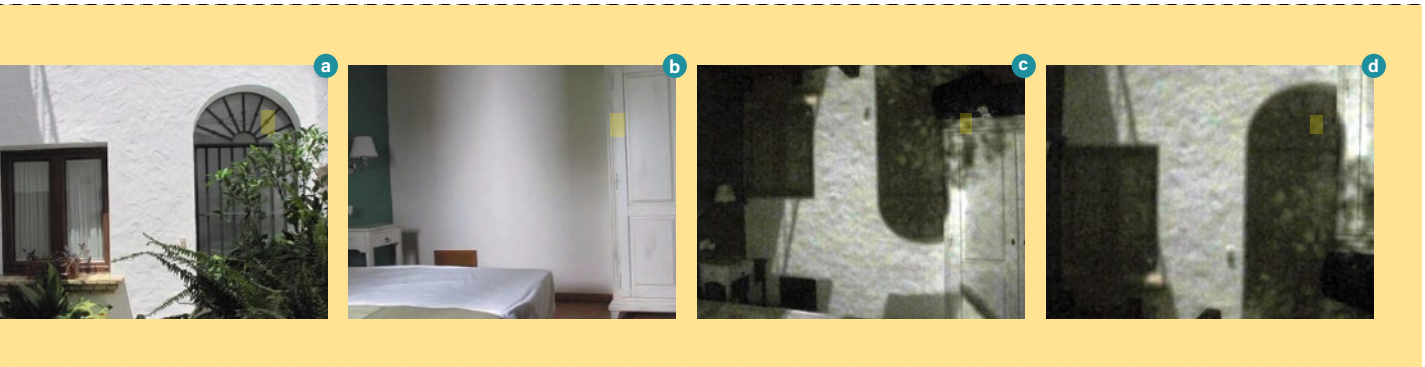
→
Le patio, à l'extérieur de la chambre d'hôtel où Antonio Torralba a remarqué que sa fenêtre agissait comme un sténopé accidentel (a). L'image floue du patio sur le mur (b) peut être rendue plus nette (c) en couvrant une grande partie de la fenêtre avec du carton pour réduire la taille du sténopé. Vue à l'envers (d), l'image révèle la scène d'extérieur.

lorsqu'il s'agit d'interpréter des ombres. Peut-être est-ce parce que beaucoup de choses que nous voyons ne sont pas vraiment des ombres, et notre œil renonce à essayer de leur donner un autre sens ».

Les rayons lumineux porteurs des images du monde situé hors de notre champ de vision frappent constamment les murs et d'autres surfaces et se réfléchissent jusque dans nos yeux. Mais pourquoi ces « vestiges visuels » sont-ils si ténus ? C'est parce que ces rayons existent en trop grand nombre et voyagent dans trop de directions différentes. Ils s'affaiblissent.

Pour donner forme à une image, la quantité de rayons lumineux qui atteignent une surface donnée doit être fortement réduite de sorte que seuls quelques rayons en particulier soient vus. C'est justement la fonction d'un sténopé. En 2012, l'idée initiale d'Antonio Torralba et de Bill Freeman consistait à dire que notre environnement restreint naturellement les rayons lumineux, mais que les images floues qui subsistent restent suffisantes pour être traitées par des ordinateurs.

Plus l'ouverture d'un sténopé est étroite, plus l'image résultante est précise. La fenêtre de la chambre d'hôtel d'Antonio Torralba était trop grande pour produire une image claire. Cependant, avec Bill Freeman, ils ont suivi la piste de la caméra antisténopé. L'idée est la suivante : un petit point opaque placé devant un film (là où dans un sténopé on trouverait le trou), en bloquant certains rayons lumineux, conduit à la formation d'une image correspondant à l'ombre des éléments d'une scène, une image en négatif. Dès lors, dans



la chambre d'hôtel, n'importe quel petit objet obstruant la lumière conduit à la formation d'images un peu partout.

Imaginez filmer le mur intérieur d'une pièce à travers un petit orifice dans le store de la fenêtre. Vous ne voyez pas grand-chose ! Soudain, le bras d'une personne traverse votre champ de vision. La comparaison de l'intensité de la lumière sur le mur quand le bras est présent puis absent renseigne sur la scène. Des rayons lumineux touchant le mur dans une image de la vidéo sont brièvement bloqués par le bras dans la suivante. En soustrayant les données de la deuxième image de celles de la première, vous pouvez deviner ce que cachait le bras, en l'occurrence des rayons lumineux issus d'une partie de la pièce. En regardant ce qui bloque la lumière autant que ce qui la laisse passer, vous étendez le répertoire d'images du type de celles que génère un sténopé.

Outre leurs travaux sur les sténopés afin de mieux détecter des petits changements d'intensité, Bill Freeman et ses collègues ont aussi mis au point des algorithmes destinés à analyser et amplifier les changements subtils de couleur, comme ceux qui se produisent sur le visage humain quand le sang est pompé à travers ses vaisseaux, ainsi que de minuscules mouvements, notamment ceux des paquets de chips.

La résolution est telle qu'ils détectent désormais des mouvements qui seraient normalement noyés dans le bruit. Leur méthode consiste à transformer mathématiquement des images en ondes sinusoïdales. De la sorte, le signal n'est pas dominé par du bruit, car les ondes sinusoïdales représentent des moyennes

sur de nombreux pixels : le bruit est réparti. Les chercheurs peuvent par conséquent détecter des changements dans les ondes sinusoïdales d'une image à une autre dans une séquence vidéo, amplifier ces modifications et les transformer à nouveau en images.

CHEMISE ROUGE ET PLANTE VERTE

En combinant ces astuces, il devient possible d'accéder à des informations visuelles cachées. En 2017, Katie Bouman, à l'époque dans l'équipe de Bill Freeman et aujourd'hui au centre Harvard-Smithsonian d'astrophysique, a montré que les coins des bâtiments agissent comme des caméras qui créent des images grossières de ce qui se trouve derrière l'angle.

Comme dans le sténopé et l'antisténopé, les coins et les rebords restreignent le passage des rayons lumineux. En utilisant du matériel ordinaire, même des smartphones, en plein jour, Katie Bouman et ses collègues ont filmé la zone plus ou moins ombrée (la pénombre), éclairée par des rayons lumineux venant de derrière l'angle d'un bâtiment. Si par exemple une personne portant une chemise rouge y marche, le vêtement projette une toute petite quantité de lumière rouge dans la zone de pénombre filmée, invisible à l'œil nu, mais claire comme de l'eau de roche après traitement.

En 2018, Bill Freeman et ses collègues ont reconstruit une image de l'intensité et de la direction des rayons lumineux dans toute la pièce (on parle de « champ lumineux ») à partir des ombres projetées par une plante verte située près du mur. Les feuilles agissent