

A Generalized Ray Formulation For Wave-Optics Rendering

SHLOMI STEINBERG, RAVI RAMAMOORTHY, BENEDIKT BITTERLI,
EUGENE D'EON, LING-QI YAN, MATT PHARR

April 26, 2023

Physical optic rendering?

Plan de la présentation

- ✦ Un rapide rappel sur le raytracing classique.
- ✦ Pourquoi ce raytracing n'est pas suffisant?
- ✦ Qu'est ce que le wave-optics et physical-optics rendering?
- ✦ Comment rendre cela pratique?

Le raytracing

Le raytracing classique marche bien pour plusieurs raison:

- ✱ Chaque rayon est indépendant -> permet de faire du Monte Carlo
- ✱ La propagation des rayons se traite de manière local -> permet de faire rebondir des rayons facilement

On dira que les rayons sont linéaire et local.

**Pourquoi ce raytracing n'est pas
suffisant?**

Phénomène de diffraction

Voir cette magnifique vidéo de bulles (je sais pas mettre de vidéo dans un beamer)

Du coup, en attendant que je trouve la vidéo, voici 2 photos réels d'une roue de vélo:



Wave optics et physical optics

Un formalisme pour traiter d'ondes

Commençons par le papier [Towards Practical Physical-Optics Rendering](#)

Un formalisme pour traiter d'ondes

Commençons par le papier [Towards Practical Physical-Optics Rendering](#)

Rapidement, on a l'équation du champ électrique pour une longueur d'onde.

$$\vec{E}(\vec{p}, t) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{\frac{3}{2}} \int_{\mathbb{R}^3} d^3\vec{k} \vec{a}_{\perp}(\vec{k}) e^{i(\vec{k} \cdot \vec{p} - ckt)}$$

Ce champ définit naturellement la fonction d'onde: (Fourier)

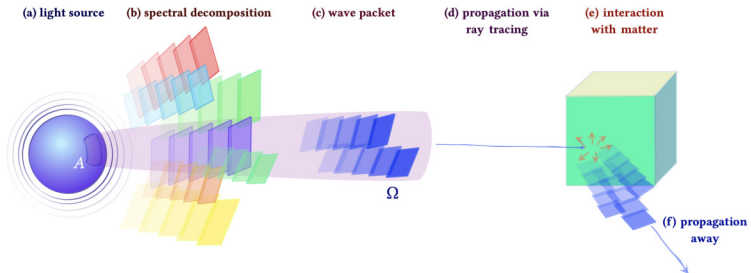
$$\vec{\psi}(\vec{k}, t) = \vec{a}(\vec{k}) e^{-i\omega t}$$

Generalisation de la radiance

Après beaucoup de calcul, ils arrivent à définir une généralisation de la radiance:

$$\vec{\mathcal{L}}^{[u]}(r, \vec{\xi}; \omega) \triangleq e^{ik\xi_z} \left[L_x g^{\Theta_x}(\vec{\xi}) \vec{S}_{\text{LHP}} + L_y g^{\Theta_y}(\vec{\xi}) \vec{S}_{\text{LVP}} + \sqrt{L_x L_y} g^{\Theta_{1/2}}(\vec{\xi}) \vec{S}_c(\chi, \varsigma) \right],$$

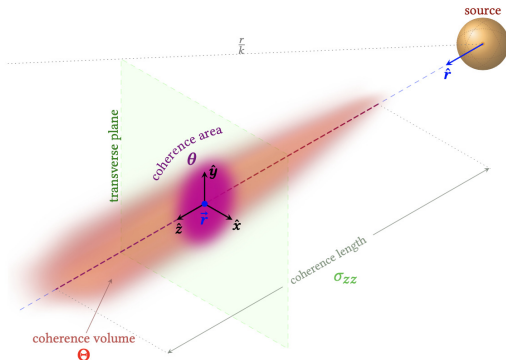
qui permet caractériser la radiance et la capacité d'un paquet d'onde à interférer avec lui-même:



De cette formule, une matrice nommée shape matrix apparaît qui caractérise la cohérence d'un paquet d'onde:

$$\Theta_{x,y,1/2} \triangleq \begin{pmatrix} \frac{r^2}{k^2} \theta_{x,y,1/2} & \\ & \sigma_{zz}^2 \end{pmatrix}$$

Visuellement, elle correspond à:



Interaction avec la matière

On peut alors définir les interactions avec la matière, grâce à la shape matrix:

$$\begin{aligned}\mathcal{W}_{\text{scat}}\left\{\vec{\mathcal{S}}^{[\mu_i]}\right\} &\triangleq \cos \vartheta_o \mathbf{M}^{[\mu_i] \rightarrow [\mu_o]} \\ &\times \left[S_x^{(i)} \mathcal{D}\left\{\Xi_x^{(i)}\right\} \vec{\mathcal{S}}_{\text{LHP}} + S_y^{(i)} \mathcal{D}\left\{\Xi_y^{(i)}\right\} \vec{\mathcal{S}}_{\text{LVP}} \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{S_x^{(i)} S_y^{(i)}} \mathcal{D}\left\{\Xi_{1/2}^{(i)}\right\} \vec{\mathcal{S}}_c\left(\chi^{(i)}, \varsigma^{(i)}\right) \right],\end{aligned}$$

$$\mathcal{W}_{\text{direct}}\left\{\vec{\mathcal{S}}^{(i)}\right\} \triangleq \mathbf{M}_{\text{direct}}^{[\mu_i] \rightarrow [\mu_o]} \vec{\mathcal{S}}^{(i)}$$

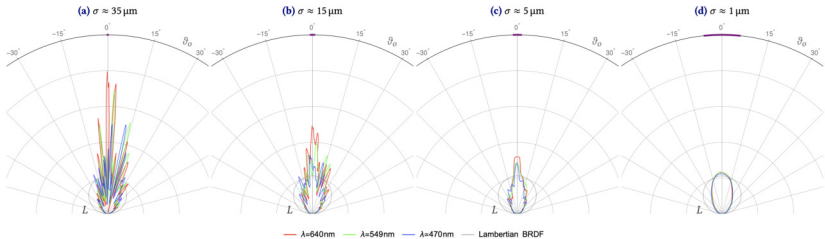
$$\mathcal{W} \triangleq \alpha_{\text{direct}} \mathcal{W}_{\text{direct}}\left\{\vec{\mathcal{S}}^{(i)}\right\} + (1 - \alpha_{\text{direct}}) \mathcal{W}_{\text{scat}}\left\{\vec{\mathcal{S}}^{[\mu_i]}\right\}$$

Nouvelle équation du rendu

Tout cela pour arriver à une nouvelle equation du rendu.

$$\vec{\mathcal{L}}^{[\mu_o]} = \int_{\mathbb{S}_+^2} d^2\hat{s} \, \mathcal{W}\{\vec{\mathcal{L}}^{[\mu_i]}\} \, \hat{s} \cdot \hat{n} ,$$

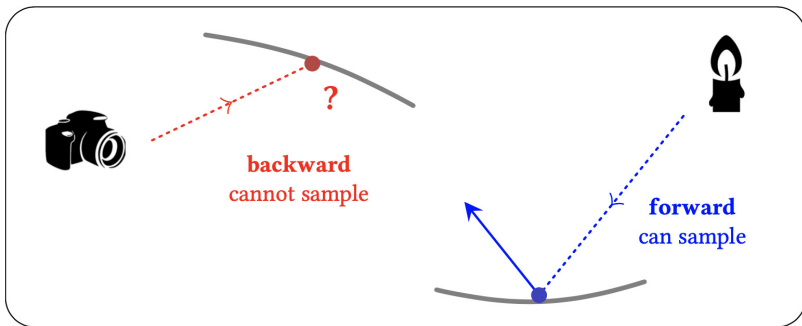
Un exemple de wave bsdf, qui dépend de la cohérence de la lumière.



On perd alors la propriété de localité de l'équation de rendu.

Le sampling problem

Pour pouvoir faire un importance sampling qui fonctionne, on a besoin de savoir la cohérence de la lumière. Rendant l'importance sampling d'un tracé de rayons de la caméra vers la lumière impossible.



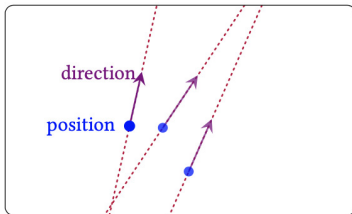
Resultats du PLT solveur



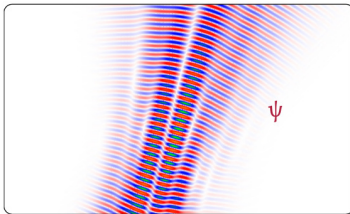
Scene		Samples	Rendering time
Bicycle day (3125 × 2000)	Fig. 1	150k	43 h 40 min
Bicycle night (2100 × 2100)	Fig. 10	90k	17 h 30 min

Comment ils rendent ça pratique

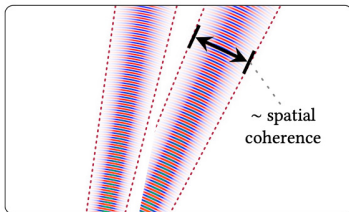
GeneralizedRay



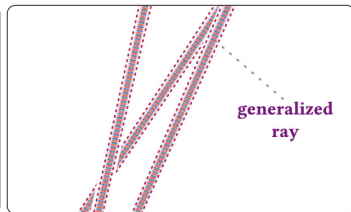
(a) ray optics



(b) wave optics



(c) PLT

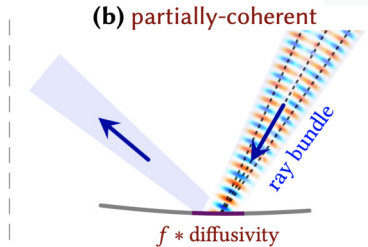
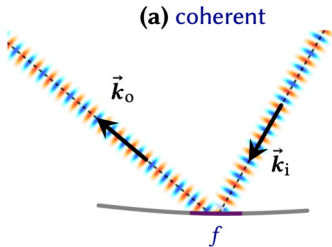


(d) generalized rays

Pourquoi ça marche

En long, lisez **vive la physique**.

En court, les interaction partiellement cohérente seront retrouver lorsque plusieurs rayons cohérents arriveront sur la matière.



En quoi c'est mieux

Ils obtiennent alors une équation du rendu plus simple que dans PLT:

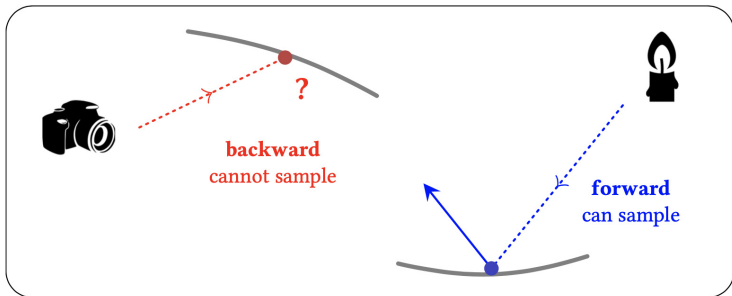
$$\vec{L}_o(\vec{r}, \vec{k}_o) = \vec{L}_e(\vec{r}, \vec{k}_o) + \int d^3\vec{k}_i f(\vec{r}, \vec{k}_i, \vec{k}_o) \vec{L}_i(\vec{r}, \vec{k}_i)$$

En quoi c'est mieux

Ils obtiennent alors une équation du rendu plus simple que dans PLT:

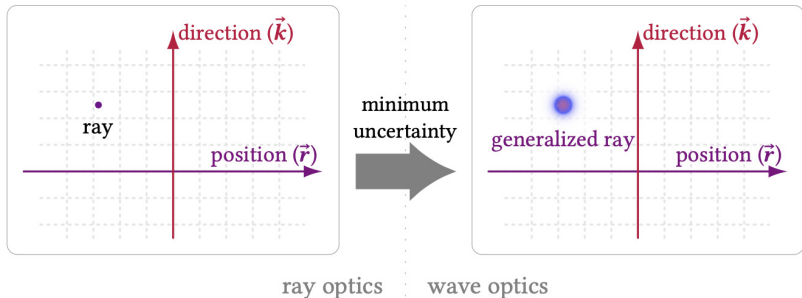
$$\vec{L}_o(\vec{r}, \vec{k}_o) = \vec{L}_e(\vec{r}, \vec{k}_o) + \int d^3\vec{k}_i f(\vec{r}, \vec{k}_i, \vec{k}_o) \vec{L}_i(\vec{r}, \vec{k}_i)$$

Qui est de nouveau local, ce qui résout le "sampling problem".



Problème d'insertitude

Mais comme on considère des ondes, à cause du problème d'insertitude, on ne peut pas utiliser des diracs dans l'espace des rayons comme on le fait normalement.

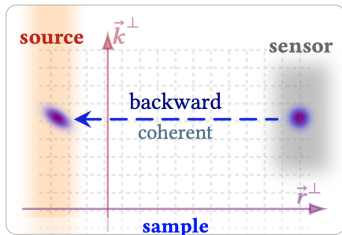


En pratique

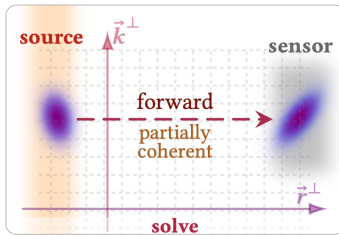
En pratique, ils ne font pas que lancer des generalized rays. Ils font ce qu'ils appellent "sample and solve".

- ✦ Sample: Un lancé d'une generalized ray.
- ✦ Solve: Il prene le trajet du generalized ray dans le solveur PLT.

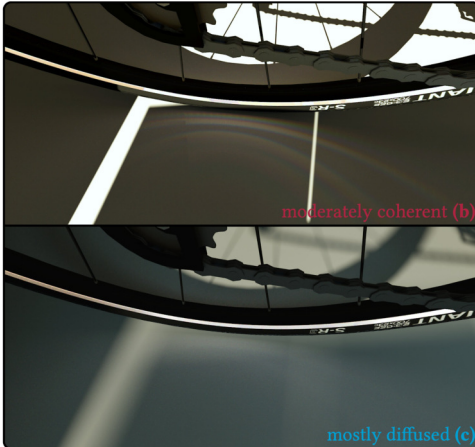
Cette étape de solve bien que pas neccessaire, permet en pratique en temps de calcul 2 à 5 fois plus faible.



(a) path sampling via generalized rays



(b) partially-coherent transport



Scene	Frame time (1 spp)	Figure	
Snake enclosure	116 ms	Figs. 1 and 13	1440p, 64k <i>SPP</i>
MS playground	180 ms	Fig. 9	1440p, 16k <i>SPP</i>
Bike	240 ms	Fig. 14	1440p, 4k <i>SPP</i>
CD	42 ms	Fig. 11	1080p, 2M <i>SPP</i>

Voir la vidéo (oui je sais pas mettre une vidéo dans des slides, désolé)