

1 Mise à jour des positions des particules

Les plantes sont représentées comme des particules orientées qui définissent implicitement un graphe de la structure de ramification. Pour chaque particule, nous maintenons un groupe de particules qui relie une particule à ses particules adjacentes. Le groupe de particules contient la particule actuelle, la particule parente et chacune de ses successeurs, ce qui produit une relation hiérarchique pour la structure de ramification. Une particule apparaît généralement dans plusieurs groupes car elle est dans les groupes de particules de ses particules adjacentes. La mise à jour des positions des particules est effectuée séquentiellement et une fois par pas de temps dans l'ordre suivant : pour chaque particule, nous calculons d'abord une position et une orientation prédites qui ne dépendent que des quantités locales de particules. Ensuite, une matrice de rotation qui correspond aux positions actuelles est calculée en utilisant l'appariement de formes généralisé. Nous calculons la position cible après une modification pour la particule elle-même ainsi que pour son groupe de particules. La position finale d'une particule est une somme pondérée de la position cible calculée par la particule elle-même et des positions cibles calculées pour la particule évaluée par les membres du groupe de particules (Figures 4 (a, b)). Les calculs sont effectués séquentiellement et les particules n'ont pas besoin d'être triées. Dans la première étape, nous calculons une position prédite X_p pour toutes les particules comme suit :

$$X_p = x + v\Delta t + \frac{(a_g + a_e)\Delta t^2}{2}$$

où :

- x : position de la particule
- v : vitesse de la particule
- Δt : pas de simulation
- a_g : accélération gravitationnelle
- a_e : accélération externe causée par les particules fluides

2 Calcul de la rotation optimale

Dans l'étape suivante, l'appariement de formes calcule la rotation optimale R qui correspond à l'état de repos à l'état actuel de chaque groupe de particules. La rotation est calculée via une décomposition polaire à partir de la matrice de moment A (Équation 14). La matrice de moment dépend de la masse m de chaque particule individuelle, qui est calculée à partir d'un ellipsoïde avec un volume V et une densité ρ :

$$m = V\rho = \frac{4}{3}\pi abc\rho/3$$

où a, b, c représentent les axes de l'ellipsoïde. Ayant calculé la rotation optimale de la particule, nous pouvons calculer la position cible.

3 Calcul de la position cible

Pour chaque groupe de particules, la position cible x_t est calculée comme suit :

$$x_t = R(\bar{x} - \bar{c}) + c$$

où :

- R : matrice de rotation optimale
- c : centre de masse du groupe de particules
- \bar{c} : centre de masse au repos
- \bar{x} : position au repos

4 Calcul de la position finale

La position finale x_g d'une particule est la somme pondérée des positions cibles de la particule elle-même et de ses particules adjacentes :

$$x_g = \sum_i \frac{w_i x_{it}}{W}$$

où :

- W : somme de tous les poids proportionnels à la masse et à la position dans la branche
- w : poids individuel
- x_{it} : position cible de la particule i

La position cible est calculée une fois par pas de temps. Les particules parentes ont une influence plus grande que les branches enfants afin que les particules suivent toujours leurs parents. Les autres attributs des particules, tels que la vitesse, la vitesse angulaire et l'orientation, sont mis à jour à partir de leurs valeurs prédites par un schéma d'intégration comme décrit dans [MC11].

5 Simulation basée sur la physique

Un avantage clé d'une simulation basée sur la physique est qu'elle facilite la modélisation de la capacité des plantes à s'attacher à des objets. Pour cela, nous fournissons des points d'ancrage pour les particules qui sont attachées à la surface d'une structure de support. Les points d'ancrage sont créés dynamiquement lorsqu'une particule en croissance touche un objet avec une force d'attraction proportionnelle à la taille de la particule. La position de la particule est corrigée à la nouvelle position x_p par les points d'ancrage à proximité afin qu'elle adhère à la surface :

$$x_p = x_p + \phi(x_{\text{anchor}} - x_p)$$

où :

- x_p : position de la particule
- x_{anchor} : position du point d'ancrage
- ϕ : force d'attachement ($0 < \phi < 1$)

Si la position d'une particule dépasse un seuil de distance par rapport à un point d'ancrage, le point d'ancrage est libéré.

6 Adaptation à la Surface

La plante recherche une structure de support à proximité et dirige sa croissance vers cette direction. Si une particule de plante s'approche d'un objet, la plante s'oriente parallèlement à la surface. L'axe a_a et l'angle de rotation α_a (Figure 4 (c)) sont :

$$a_a = \hat{v}_s \times \hat{v}_f$$

$$\alpha_a = (\hat{v}_s \cdot \hat{v}_f) \tau \Delta t$$

où :

- v_s : vecteur pointant vers la surface la plus proche
- v_f : vecteur avant actuel de la particule
- τ : paramètre défini par l'utilisateur qui contrôle la force d'adaptation à la surface ($0 \leq \tau \leq 1$)
- Δt : pas de simulation

7 Phototropisme

Le phototropisme est la réponse des plantes à la lumière qui oriente les organes des plantes (feuilles et fleurs) vers la direction de la lumière et aide les apex à atteindre des zones avec une illumination plus intense. De manière similaire au cas précédent, l'axe de rotation a_p et l'angle α_p sont :

$$a_p = \hat{v}_l \times \hat{v}_f$$

$$\alpha_p = (1 - O) \eta \Delta t$$

où :

- v_f : vecteur avant actuel de la particule
- v_l : vecteur vers la source de lumière
- O : occultation de la lumière à l'emplacement de la particule
- η : paramètre qui contrôle la force de réponse au phototropisme
- Δt : pas de simulation

8 Intégration de la Croissance

Dans la dernière étape, nous intégrons tous les changements et calculons la nouvelle position des particules. L'approche de simulation dynamique (Section 4.1) utilise la forme de la plante dans un état de repos pour la récupérer partiellement des déformations. Par conséquent, pour incorporer des changements plastiques dans la plante, les états de repos ainsi que l'état actuel doivent être mis à jour ; nous faisons cela de manière similaire à la déformation de croissance proposée par Pirk et al. [PNH*14]. Une matrice de rotation accumulée R_g incorporant les changements d'orientation est calculée à partir des matrices de rotation en utilisant les axes précédemment calculés :

$$R_g = R(a_a, \alpha_a)R(a_p, \alpha_p)$$

où :

- $R(a, \alpha)$: retourne une matrice de rotation pour l'axe a donné et l'angle α (Figure 4 (e))
- a_a : axe de rotation calculé précédemment
- α_a : angle de rotation calculé précédemment
- a_p : axe de rotation calculé précédemment
- α_p : angle de rotation calculé précédemment

9 Mise à jour des orientations des particules

Enfin, toutes les orientations des particules sont mises à jour en intégrant les rotations de croissance et les changements de taille dans l'état actuel et l'état de repos :

$$R = RR_g$$

$$\bar{R} = \bar{R}R^{-1}R_g$$

où :

- R : orientation actuelle représentée sous forme de matrice
- \bar{R} : orientation de repos représentée sous forme de matrice

10 Mise à jour des positions des particules

De même, les positions des particules dans leur état actuel ainsi que dans leur état de repos sont mises à jour par :

$$x = x_h + \bar{R}Ru_f$$

$$\bar{x} = \bar{x}_h + \bar{R}u_f$$

où :

- x_h : positions des têtes des particules parentes
- \bar{x}_h : positions des têtes des particules parentes au repos
- u_f : vecteur avant $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

Si une position de repos ou une position actuelle de particule change le centre de masse d'une particule, chaque groupe contenant la particule doit être recalculé.

11 Représentation SPH

La SPH représente le mouvement induit par un fluide à travers l'advection d'un ensemble de particules indépendantes qui transportent des quantités physiques, par exemple, la pression et la masse. L'accélération a_i de la i -ème particule est calculée comme suit :

$$a_i = \frac{dv_i}{dt} = \frac{(-\nabla p + \mu \nabla^2 v)}{\rho}$$

où :

- $-\nabla p$: pression
- $\mu \nabla^2 v$: viscosité
- ρ : densité

La densité ρ est un paramètre défini par l'utilisateur qui correspond aux densités du bois et du fluide. Nous avons utilisé des valeurs comprises entre $0.3 - 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ pour le bois et $1.3 - 1.4 \text{ kg/m}^3$ pour l'air. L'accélération est ajoutée comme une influence externe dans l'étape de prédiction de position (Équation 1) (voir Figure 4 (f)).

12 Calcul des nouvelles positions des fluides

Les nouvelles positions des fluides sont calculées en utilisant l'intégration eulérienne. Les forces d'interaction ne sont calculées qu'entre les particules fluides et les particules de branches entièrement développées pour éviter de grandes différences de densité qui peuvent entraîner une instabilité dans la simulation. Les particules sont influencées par d'autres particules dans leur rayon de support h . Les quantités de fluide $A(x)$ à un certain emplacement x sont calculées comme une somme pondérée des particules voisines j :

$$A(x) = \sum_{j=1}^N V_j A_j W(\eta)$$

où :

- V_j : volume
- W : noyau de lissage avec vecteur de position normalisé $\eta = \frac{(x-x_j)}{h}$

13 Calcul des forces pour les particules ellipsoïdales

Cependant, pour les particules ellipsoïdales, le rayon de support n'est pas un scalaire. Comme proposé par [OVSM97], nous mappons le vecteur de position de l'espace réel à l'espace de position normalisé par :

$$\eta = G(x - x_j)$$

où le tenseur G effectue une transformation linéaire. Les forces sont calculées de la même manière que dans Müller et al. [MCG03].

14 Mesures de Performance

Fig.	NP(k)	T(ms)	R(%)	P(%)	G(%)	C(%)
1	10	18,16	27,65	29,38	42,42	0,55
7	plant:5 fluid:1	20,40	26,01 43,85	7,83	22,12	0,19
9	5	9,66	44,42	14,11	41,07	0,40
11	10	17,05	29,46	29,68	40,37	0,48
10	7	16,82	26,87	34,17	38,46	0,50
14,l	10	16,87	29,77	33,55	35,08	1,60
14,r	25	51,76	11,63	39,51	48,33	0,53

Table 1: Mesures de performance pour nos expériences, où NP désigne le nombre de particules, T le temps total de simulation, et les pourcentages respectifs pour le rendu (R), la physique (P), la croissance (G) et la gestion des collisions d'obstacles (C). Les temps indiquent que la modélisation et l'édition peuvent être effectuées efficacement en temps réel.