« Procédé et dispositif de prototypage rapide »

Domaine technique

La présente invention concerne un procédé pour fabriquer un produit, tel un prototype. Elle concerne aussi un dispositif pour mettre en œuvre le procédé selon l'invention, et un produit obtenu par le procédé ou dispositif selon l'invention.

L'invention permet notamment de réaliser plusieurs lithographies successives de couches superposées afin de fabriquer un produit en trois dimensions. Le domaine de l'invention est donc plus particulièrement mais de manière non limitative celui du prototypage rapide et de la stéréolithographie.

Etat de la technique antérieure

On connaît des procédés de fabrication de produits (typiquement des prototypes) en trois dimensions par empilement de couches, comme par exemple par stéréolithographie ou par dépôt de filament (ou FDM pour « fused deposition Modeling »).

Le principe de la stéréolithographie est le suivant :

1) on projette au moins une image de projection sur une couche photo réactive, ladite couche photo réactive se solidifiant sur l'aire où l'image de projection est projetée, puis

2) on recouvre la couche solidifiée par une nouvelle couche de résine photo réactive, puis

3) on projette une nouvelle fois au moins une image de projection sur cette nouvelle couche photo réactive,

les étapes 2) et 3) étant réitérées autant de fois que nécessaire pour réaliser un produit en trois dimensions. Généralement, l'image de projection varie pour chaque couche. Par exemple, pour réaliser une boule, cette image consiste en un disque dont le diamètre croît d'un premier sommet de la boule jusqu'au milieu de la boule, puis décroît du milieu de la boule jusqu'à un deuxième sommet de la boule.

Cette technique permet de réaliser des produits en trois dimensions directement dans une résine photopolymérisable sans usinage. L'image solidifiée ou à solidifier d'une couche est appelée image de consigne.

L'image de projection peut être bien plus petite que l'aire à solidifier. Pour une même couche, plusieurs projections sont donc nécessaires. Par exemple, pour une image de consigne consistant en un carré de 30 centimètres de côté, on projette successivement et côte à côte neuf fois une image de projection consistant en un carré de 10 centimètres de côté.

Le prototypage rapide par dépôt de filament consiste à faire fondre une résine (généralement du plastique) à travers une buse chauffée à haute température, de manière à en faire sortir un filament en fusion (de l'ordre du dixième de millimètre) de résine et à déposer ce fil pour le coller par fusion sur une couche précédemment déposée.

Dans les procédés de fabrication de produits en trois dimensions spatiales (3D) par empilement de couches (par opposition aux machines d'usinage qui fonctionnent par enlèvement de matière), on a une étape de transformation d'informations en trois dimensions spatiales (3D) vers une série d'informations de section en deux dimensions spatiales (2D) représentatives des couches. Les couches peuvent être planes comme dans la stéréolithographie ou courbées comme dans certains cas de dépôts de filament. La technique classique de transformation du fichier 3D en fichier 2D consiste à calculer un empilement de sections mathématiques, correspondant à l'empilement réel des couches lors de la fabrication.

Une fois qu'on dispose d'informations géométriques représentatives d'une section du produit à fabriquer, on est amené à effectuer un traitement complémentaire de cette information 2D de section et obtenir ainsi pour chaque couche des informations 2D de fabrication adaptées à la technologie utilisée.

Par exemple, on peut définir un parcours sous forme de vecteurs (vecteurs de contour, vecteurs de remplissage) comme par exemple dans le cas d'une machine de prototypage à laser et miroirs galvanométriques (stéréolithographie, frittage laser). Pour une fabrication par dépôt de filament, c'est une démarche proche mais le parcours optimal est différent car la dynamique de la tête physique déposant du matériau est très différente de celle d'un impact lumineux défléchi par des miroirs.

Dans d'autres exemples, on peut utiliser des définitions matricielles plutôt que vectorielles, comme par exemple dans le cas de machines de

prototypage à projection de lumière directe (ou DLP pour « Digital Light Processing ® ») ou à têtes d'impression à buses. Le traitement d'une couche consiste alors à définir quels sont les pixels de la couche qui se trouvent dans la matière du produit à fabriquer. Pour ceci, on applique l'algorithme suivant (« scanline fill ») en référence à la figure 1:

Pour chacune des sections à traiter :

- on applique une grille 1 sur la couche 2,
- pour chaque ligne 3 de la grille (on pourrait aussi itérer sur les colonnes...) :
  - on démarre d'une extrémité de la ligne, et on se dirige vers l'autre bord de la section (de gauche à droite sur la figure 1), en mettant à jour un compteur "nombre d'entrée/sortie dans la matière" ayant pour valeur initiale "0" (on considère qu'il n'y a pas de matière au bord de la grille) : chaque fois qu'on croise une limite 4 d'entrée dans la matière, on augmente le compteur de 1, et on le décrémente de 1 chaque fois qu'on croise une limite 5 de sortie de la matière ;
  - à chaque fois qu'on passe sur un pixel, on regarde l'état du compteur: s'il est supérieur à 0, on coche le pixel comme étant à l'intérieur de l'objet défini par les contours 4, 5, et on coche le pixel comme étant à l'extérieur de l'objet défini par les contours 4, 5 sinon.

La grille 1 de la figure peut être plus généralement un pavage quelconque par exemple du type nid d'abeille. Les itérations se font alors non pas sur des "lignes" ou "colonnes", mais selon les axes préférentiels des pavages utilisés.

Un tel traitement complémentaire a des inconvénients.

Tout d'abord, il nécessite un temps de calcul non négligeable.

Pour ne pas immobiliser une machine de fabrication pendant ce traitement, et du fait de la complexité de ce traitement, ce traitement doit être effectué sur un calculateur dédié indépendant de la machine de fabrication, ce qui implique en pratique en surplus une étape de transfert des informations du calculateur vers un autre ordinateur de contrôle de la machine de fabrication.

En outre, du fait de cette étape de transfert, les informations de fabrication doivent être limitées en volume pour éviter que le transfert ne

prenne trop de temps, ce qui limite la résolution spatiale du produit à fabriquer.

Enfin, la parallélisation naturelle de ce traitement est simple à mettre en œuvre: on peut faire le traitement pour chaque section indépendamment et en parallèle. Ces traitements ont toutes les chances de prendre un temps différent d'une couche à l'autre, par exemple en fonction du nombre de limites d'entrée et de sortie de la couche. Donc dans le cas général les traitements ne seront pas de même durée d'une couche à une autre et vont devoir utiliser des mécanismes itératifs en interne à chaque traitement de couche, et de synchronisation complexes entre traitements de couches.

De façon similaire, à l'intérieur d'un de ces traitements, on peut effectuer en parallèle les parcours de lignes d'une extrémité à l'autre du champ (étape 2 ci-dessus). On se retrouve avec une situation comparable à la mise en parallèle des traitements de sections: on a des lignes qui vont être plus complexes que d'autres, en fonction du nombre de franchissements de lignes d'entrées ou de sorties, et avec des algorithmes itératifs et des synchronisations complexes.

Il est donc possible d'imaginer appliquer un parallélisme complexe mais non "massif", c'est-à-dire uniquement de type "MIMD" (pour « Multiple Instruction on Multiple Data ») et non "SIMD" (pour « Single Instruction on Multiple Data »), alors que l'on considère que les algorithmes SIMD sont potentiellement plus efficaces, mais sont restreints dans leurs champs d'application à des opérations particulièrement simples. Pour rappel, le parallélisme SIMD est un des quatre modes de fonctionnement définis par la taxonomie de Flynn et désigne un mode de fonctionnement où plusieurs unités de calcul fonctionnent en parallèle, de sorte que la même instruction soit appliquée en parallèle dans le temps à plusieurs données pour produire plusieurs résultats.

Le but de la présente invention est de proposer un procédé ou dispositif de lithographie permettant de résoudre au moins un des inconvénients susmentionnés.

Exposé de l'invention

Cet objectif est atteint avec un procédé pour fabriquer un produit, comprenant une détermination (typiquement à partir de données descriptives de l'objet) de si des points d'un espace fini sont à l'intérieur ou à l'extérieur d'un objet décomposé en surfaces élémentaires, ledit objet correspondant typiquement au produit à fabriquer ou à une partie ou couche ou tranche du produit à fabriquer,

caractérisé en ce que pour chaque point de travail pour lequel on cherche à déterminer s'il est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet, le procédé comprend :

- une détermination d'au moins une ligne parmi une ligne passant par ce point de travail auquel est associé un compteur dédié uniquement à ce point de travail, et une ligne passant par une image (translation, rotation, combinaison des deux, etc…) du point de travail à laquelle est associé un compteur dédié uniquement à cette image du point de travail, et
- une itération, sur chacune des surfaces élémentaires, des opérations suivantes :
    - une recherche d'une intersection entre la surface élémentaire et une seule des lignes parmi la ligne passant par le point de travail et la ligne passant par l'image du point de travail,
    - une modification du compteur si l'intersection existe, et
- une détermination de si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet en fonction du compteur dédié uniquement au point de travail.

Chaque ligne peut être une ligne droite ou une ligne courbe.

Dans une première variante, le procédé selon l'invention est caractérisé en ce que:

- la détermination d'au moins une ligne comprend une détermination d'une ligne passant par le point de travail auquel est associé un compteur dédié uniquement à ce point de travail, et/ou
- l'itération comprend une itération, sur chacune des surfaces élémentaires, des opérations suivantes :

- une recherche d'une intersection entre la surface élémentaire et la ligne passant par le point de travail,
- une modification du compteur si l'intersection existe, et/ou

- la détermination de si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet comprend une détermination de si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet en fonction de la valeur du compteur dédié uniquement au point de travail.

Dans cette première variante, la ligne peut passer par une origine, et la modification du compteur peut comprendre :

- Si l'intersection est située au delà du point de travail par rapport à l'origine de la ligne, pas de modification du compteur, et
- Si l'intersection est située non au delà du point de travail par rapport à l'origine de la ligne, une modification du compteur de façon différente selon que l'intersection de la ligne correspond à une entrée de la ligne dans l'objet ou une sortie de la ligne hors de l'objet par rapport à l'origine.

Dans une deuxième variante, le procédé selon l'invention est caractérisé en ce que:

- la détermination d'au moins une ligne comprend une détermination d'une ligne passant par le point de travail auquel est associé un compteur dédié uniquement à ce point de travail et d'une ligne passant par une image du point de travail à laquelle est associé un compteur dédié uniquement à cette image du point de travail, et/ou
- le procédé comprend en outre une séparation des surfaces élémentaires en deux groupes distincts, un groupe de surfaces d'entrée dans l'objet et un groupe de surfaces de sortie de l'objet par rapport à une direction de déplacement, et/ou
- l'itération comprend une itération, sur chacune des surfaces élémentaires, des opérations suivantes :
  - si la surface est une surface d'entrée, une recherche d'une intersection entre cette surface élémentaire et la

ligne passant par le point de travail et une modification du compteur associé au point de travail si l'intersection existe,

- si la surface est une surface de sortie, une recherche d'une intersection entre cette surface élémentaire et la ligne passant par l'image du point de travail, et une modification du compteur associé à l'image du point de travail si l'intersection existe, et/ou

- la détermination de si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet comprend une détermination de si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet en fonction du compteur dédié au point de travail et du compteur dédié à l'image du point de travail.

Dans cette deuxième variante, la détermination de si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet en fonction du compteur dédié au point de travail et du compteur dédié à l'image du point de travail peut comprendre une comparaison du compteur dédié au point de travail et du compteur dédié à l'image du point de travail.

Dans cette deuxième variante, pour l'ensemble des points de travail et des images des points de travail, les lignes passant par ces points sont de préférence parallèles.

Dans les deux variantes, pour l'ensemble des points de travail et des images des points de travail, les lignes passant par ces points peuvent être parallèles ou non parallèles.

De préférence, pour l'ensemble des points de travail et des images des points de travail, les lignes passant par ces points ne se croisent pas à l'intérieur de l'espace fini.

L'espace peut être un espace à trois dimensions ou un espace à deux dimensions. Si l'espace est un espace à trois dimensions, les points de travail peuvent être regroupés dans une surface de travail, et chaque ligne passant par un point de travail et chaque ligne passant par une image d'un point de travail est de préférence transversale à cette surface de travail par ce point de travail. La surface de travail peut correspondre à une couche ou

au moins à une partie d'une couche à déposer pour fabriquer le produit par prototypage rapide.

L'étape d'itération peut être effectuée en parallèle dans le temps pour plusieurs surfaces élémentaires.

Pour au moins une surface élémentaire, l'étape d'itération peut être effectuée en parallèle dans le temps pour plusieurs points de travail.

Les étapes d'itérations effectuées en parallèles sont de préférence synchronisées par durée d'exécution fixe, et non pas par attente de fin de tâche.

De préférence, chaque ligne passant par un point de travail est différente des autres lignes passant par les autres points de travail.

Typiquement au moins une des étapes du procédé selon l'invention précédemment décrite, de préférence chacune des étapes du procédé selon l'invention précédemment décrite n'est pas réalisée de manière purement abstraite ou purement intellectuelle mais implique l'utilisation d'un moyen technique.

Typiquement, chacune des étapes du procédé selon l'invention précédemment décrite peut être mise en œuvre par au moins un ordinateur, une unité centrale ou de calcul, un circuit électronique analogique (de préférence dédié), un circuit électronique numérique (de préférence dédié), et/ou un microprocesseur (de préférence dédié), et/ou par des moyens logiciels.

Une fois que l'on a déterminé quel point de l'espace est situé à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet, le procédé selon l'invention peut comprendre une fabrication du produit par prototypage rapide et/ou par empilement de couche, par exemple par stéréolithographie ou par dépôt de filament.

Suivant encore un autre aspect de l'invention, il est proposé un dispositif pour fabriquer un produit, mettant en œuvre un procédé selon l'invention, comprenant des moyens pour déterminer (typiquement à partir de données descriptives de l'objet) si des points d'un espace fini sont à l'intérieur ou à l'extérieur d'un objet décomposé en surfaces élémentaires, ledit objet correspondant typiquement au produit à fabriquer ou à une partie ou couche ou tranche du produit à fabriquer,

caractérisé en ce que pour chaque point de travail pour lequel on cherche à déterminer s'il est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet, le dispositif comprend :

- des moyens pour déterminer au moins une ligne parmi une ligne passant par ce point de travail auquel est associé un compteur dédié uniquement à ce point de travail, et une ligne passant par une image du point de travail à laquelle est associé un compteur dédié uniquement à cette image du point de travail, et
- des moyens pour itérer, sur chacune des surfaces élémentaires, les opérations suivantes :
    - une recherche d'une intersection entre la surface élémentaire et une seule des lignes parmi la ligne passant par le point de travail et la ligne passant par l'image du point de travail,
    - une modification du compteur si l'intersection existe, et
- des moyens pour déterminer si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet en fonction du compteur dédié uniquement au point de travail.

Chaque ligne peut être une ligne droite ou une ligne courbe.

Dans une première variante, le dispositif selon l'invention est caractérisé en ce que:

- les moyens pour déterminer l'au moins une ligne comprennent des moyens pour déterminer une ligne passant par le point de travail auquel est associé un compteur dédié uniquement à ce point de travail, et/ou
- les moyens pour itérer comprennent des moyens pour itérer, sur chacune des surfaces élémentaires, les opérations suivantes :
    - une recherche d'une intersection entre la surface élémentaire et la ligne passant par le point de travail,
    - une modification du compteur si l'intersection existe, et/ou
- les moyens pour déterminer si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet comprennent des moyens pour déterminer si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet en

fonction de la valeur du compteur dédié uniquement au point de travail.

Dans cette première variante, la ligne peut passer par une origine, et les moyens pour itérer peuvent être agencés pour modifier le compteur de la manière suivante :

- Si l'intersection est située au delà du point de travail par rapport à l'origine de la ligne, il n'y a pas de modification du compteur, et
- Si l'intersection est située non au delà du point de travail par rapport à l'origine de la ligne, il y a modification du compteur de façon différente selon que l'intersection de la ligne correspond à une entrée de la ligne dans l'objet ou une sortie de la ligne hors de l'objet par rapport à l'origine.

Dans une deuxième variante, le dispositif selon l'invention est caractérisé en ce que:

- les moyens pour déterminer l'au moins une ligne comprennent des moyens pour déterminer une ligne passant par le point de travail auquel est associé un compteur dédié uniquement à ce point de travail et pour déterminer une ligne passant par une image du point de travail à laquelle est associé un compteur dédié uniquement à cette image du point de travail, et/ou
- le dispositif comprend en outre des moyens pour séparer les surfaces élémentaires en deux groupes distincts, un groupe de surfaces d'entrée dans l'objet et un groupe de surfaces de sortie de l'objet par rapport à une direction de déplacement, et/ou
- les moyens pour itérer comprennent des moyens pour itérer, sur chacune des surfaces élémentaires, les opérations suivantes :
  - si la surface est une surface d'entrée, une recherche d'une intersection entre cette surface élémentaire et la ligne passant par le point de travail et une modification du compteur associé au point de travail si l'intersection existe,

- si la surface est une surface de sortie, une recherche d'une intersection entre cette surface élémentaire et la ligne passant par l'image du point de travail, et une modification du compteur associé à l'image du point de travail si l'intersection existe, et/ou

- les moyens pour déterminer si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet comprennent des moyens pour déterminer si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet en fonction du compteur dédié au point de travail et du compteur dédié à l'image du point de travail.

Dans cette deuxième variante, les moyens pour déterminer si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet en fonction du compteur dédié au point de travail et du compteur dédié à l'image du point de travail peuvent comprendre des moyens pour comparer le compteur dédié au point de travail et le compteur dédié à l'image du point de travail.

Dans cette deuxième variante, pour l'ensemble des points de travail et des images des points de travail, les lignes passant par ces points sont de préférence parallèles.

Dans les deux variantes, pour l'ensemble des points de travail et des images des points de travail, les lignes passant par ces points peuvent être parallèles ou non parallèles.

De préférence, pour l'ensemble des points de travail et des images des points de travail, les lignes passant par ces points ne se croisent pas à l'intérieur de l'espace fini.

L'espace peut être un espace à trois dimensions ou un espace à deux dimensions. Si l'espace est un espace à trois dimensions, les points de travail peuvent être regroupés dans une surface de travail, et chaque ligne passant par un point de travail et chaque ligne passant par une image d'un point de travail est de préférence transversale à cette surface de travail par ce point de travail. La surface de travail peut correspondre à une couche ou au moins à une partie d'une couche à déposer pour fabriquer le produit par prototypage rapide.

Les moyens pour itérer peuvent être agencés pour effectuer en parallèle dans le temps des itérations pour plusieurs surfaces élémentaires.

Pour au moins une surface élémentaire, les moyens pour itérer peuvent être agencés pour effectuer en parallèle dans le temps des itérations pour plusieurs points de travail.

Le dispositif selon l'invention peut comprendre en outre des moyens pour synchroniser par durée d'exécution fixe des itérations effectuées en parallèles, et non pas par attente de fin de tâche.

De préférence, chaque ligne passant par un point de travail est différente des autres lignes passant par les autres points de travail.

Typiquement au moins un des moyens du dispositif selon l'invention précédemment décrits, de préférence chacun des moyens du dispositif selon l'invention précédemment décrit sont des moyens techniques.

Typiquement, chacun des moyens du dispositif selon l'invention précédemment décrits peuvent comprendre au moins un ordinateur, une unité centrale ou de calcul, un circuit électronique analogique (de préférence dédié), un circuit électronique numérique (de préférence dédié), et/ou un microprocesseur (de préférence dédié), et/ou des moyens logiciels.

Le dispositif selon l'invention peut en outre comprendre des moyens pour fabriquer, une fois que l'on a déterminé quel point de l'espace est situé à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet, le produit par exemple par prototypage rapide et/ou par empilement de couche, par exemple par stéréolithographie ou par dépôt de filament.

Suivant encore un autre aspect de l'invention, il est proposé un produit obtenu par un procédé de fabrication selon l'invention ou par un dispositif de fabrication selon l'invention.

Description des figures et modes de réalisation

D'autres avantages et particularités de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée de mises en œuvre et de modes de réalisation nullement limitatifs, et des dessins annexés suivants :

- la figure 1 illustre un procédé selon l'état de la technique antérieure;
- la figure 2 illustre différentes données d'un procédé selon l'invention,

- la figure 3 illustre un premier exemple de mise en œuvre de procédé selon l'invention,

- la figure 4 illustre une superposition de plusieurs couches polymérisées se chevauchant et obtenues par le premier exemple de mise en œuvre de procédé selon l'invention,

- la figure 5 illustre différents points et images de points dans un deuxième exemple de mise en œuvre de procédé selon l'invention, et

- la figure 6 illustre le deuxième exemple de mise en œuvre de procédé selon l'invention.

On va donc, en référence aux figures 2 à 6, décrire différents modes de réalisation de procédé selon l'invention pour fabriquer un produit par prototypage rapide. On considère pour cela un objet 0 (référencé 6) qui est au moins une partie du produit à fabriquer. L'objet O est un objet :

- dans un espace E en trois dimensions (objet 3D), comme illustré sur la figure 2, et dans ce cas l'objet 3D correspond au produit 3D à fabriquer, ou
- dans un espace E en deux dimensions, comme illustré sur les figures 3 et 5 : dans ce cas là, cet objet 2D dans un espace à deux dimensions correspond typiquement à une tranche d'un produit 3D à construire ; cette tranche peut consister en une tranche quelconque, oblique ou autre du produit 3D à construire, de préférence verticale, mais ne consiste de préférence pas en une des couches horizontale à déposer pour fabriquer le produit par prototypage rapide. En outre, dans le cas où l'objet est en deux dimensions, chaque surface S_i, S_j, P ou R décrite par la suite est une surface de largeur nulle, c'est-à-dire une ligne.

Par espace en deux dimensions, on entend typiquement:

- soit une nappe ou surface ou un plan pouvant se décomposer en points ou pixels,

- soit une couche pouvant se décomposer en voxels le long de deux directions spatiales X et Y et ayant une épaisseur d'un unique voxel le long d'une troisième direction spatiale Z.

Par espace en trois dimensions, on entend typiquement un espace pouvant se décomposer en voxels et ayant une épaisseur supérieure à un voxel le long de chacune des trois directions spatiales X, Y et Z.

On va tout d'abord décrire, en référence à la Figure 2, différentes données et informations exploitées dans les exemples de procédé selon l'invention ou nécessaires à la compréhension des exemples de procédé selon l'invention.

De façon préliminaire, on admet un certain nombre d'hypothèses. Il existe une description de l'objet O, typiquement sous la forme d'au moins un fichier informatique de données. L'objet O est supposé décrit dans l'espace fini E. L'espace E est un espace Euclidien

La description de l'objet O rend possible de déterminer sans ambiguïté si un point de E fait ou non partie de l'objet O. Cela peut impliquer la correction d'ambigüités qu'on trouve parfois dans certains fichiers dégradés (fichiers dits non fermés). De nombreux logiciels permettent de corriger manuellement ou automatiquement ces fichiers. Dans le cadre des exemples décrits de l'invention, on se place dans le cas où toutes les ambiguïtés ont été levées.

La description de l'objet O a pour forme une décomposition de l'objet O en plusieurs surfaces élémentaires S_i orientées et de préférence planes :

$$O = \bigcup_i S_i$$

Par exemple, cette condition est assurée si l'objet O est décrit dans un standard de fait du prototypage rapide, c'est-à-dire sous la forme d'une collection de triangles orientés. Un tel standard a pour nom STL (pour « Stéréolithographie »). Si l'objet O est dans un format en provenance d'un logiciel de CAO, il existe toujours des interfaces STL qui respectent la forme originelle jusqu'à des précisions arbitrairement élevées.

Le procédé selon l'invention est réalisé à partir de ces données descriptives de l'objet O, qui prennent la forme soit d'une décomposition de l'objet O en plusieurs surfaces élémentaires S_i orientées, d'aire non nulle, et de préférence planes si l'objet O est décrit dans un espace E à trois dimensions spatiales, soit d'une décomposition de l'objet O en plusieurs lignes élémentaires S_i (aussi appelées surfaces élémentaires pour simplifier la description) orientées et de préférence droites si l'objet O est décrit dans un espace E à deux dimensions spatiales

Dans tout ce document, chaque indice i ou j est un nombre entier naturel entre 1 et M, avec M par exemple selon le cas un nombre total de points de travail D_i ou de surfaces élémentaires respectivement S_i ou S_j.

On définit un plan de travail P, (référencé 7) orienté par sa normale N (référencé 8).

On définit une projection F qui a tout point X (ou A_E ou Y ou D_i selon le point considéré) de E n'appartenant pas à P associe un point A_P appartenant à P, ou bien indique qu'il n'y a pas de point de P satisfaisant la projection, c'est-à-dire que F ne s'applique pas. Lorsque F s'applique, on note A_P par F(X).p le point de P projection par F de X, ou encore par $F(D_i).p$ (référencé 9) le point de P projection par F de D_i.

F satisfait les conditions suivantes:

a. L'ensemble des points de E ayant pour projection un même point A_P de P, noté $F\{A_P\}$ (ou encore $F\{F(X).p\}$, $F\{F(D_i).p\}$, … selon le point considéré, aussi noté $F\{F(X)\}$, $F\{F(D_i)\}$, …), est continu, dérivable, de dimension 1. On peut donc définir une coordonnée curviligne sur cet ensemble, ainsi qu'une tangente en tout point.

   i. on note F(X).v la coordonnée curviligne de X le long de $F\{F(X).p\}$.

   ii. on note F(X).n la tangente à $F\{F(X).p\}$ au point X.

b. Un point de E ne peut avoir qu'une seule projection par F (plus formellement: si X a pour projection F(X).p et Y a pour projection F(Y).p, et que F(X).p n'est pas confondu avec F(Y).p, alors X n'est pas confondu avec Y).

c. La "coordonnée curviligne" le long d'un ensemble $F\{A_P\}$ constitue une relation d'ordre sur $F\{A_P\}$

Les conditions a et b sont satisfaites par exemple pour une projection "orthographique" avec une direction de projection non parallèle à P et un point de perspective à l'infini, ou une projection qui part d'un point de perspective A_I qui définit A_P comme l'intersection de la droite (A_IA_E) avec P, si elle existe. Dans le cas qui nous concerne, on peut définir des projections qui ne sont plus basées sur des droites, mais sur des modélisations de chemins lumineux dans un système optique (lignes brisées), pour par exemple tenir compte des déformations géométriques du dispositif utilisé.

La condition c peut être satisfaite avec tout simplement la coordonnée curviligne égale à la distance linéaire le long de $F\{A_P\}$ entre une origine et le point considéré. Cependant, pour des raisons de compatibilité des calculs avec d'autres contraintes (utilisation de coordonnées homogènes), nous prenons de préférence l'inverse de cette distance linéaire, avec une origine qui ne se trouve pas sur P, le tout multiplié par une constante. L'algorithme s'appliquerait tout aussi bien sur d'autres exemples de fonctions monotones. L'important est qu'on puisse appliquer une relation d'ordre aux éléments de $F\{A_P\}$, c'est-à-dire comparer des valeurs entre elles et être assuré que la comparaison est transitive.

Ensuite, on considère un ensemble $D = \bigcup_i D_i$ (référencé 10) de points de travail D_i (référencé 11) de E pour lesquels il existe une projection par F, et dont on veut savoir pour chacun d'entre eux s'ils font ou non partie de l'objet O. Idéalement, cet ensemble comprend de nombreux points (des centaines de milliers par exemple), pour tirer au mieux parti du modèle SIMD qu'on vise. Le procédé selon l'invention marche particulièrement bien pour quelques dizaines à quelques dizaines de millions d'éléments.

Voici sa description (figure 2) selon les étapes I à IV suivantes:

I. De manière optionnelle, on détermine un sous-ensemble O' (référencé 14) de O : $O' = \bigcup_j S_j$ de sorte que la description de l'objet O' a pour forme une décomposition de l'objet O' en plusieurs surfaces élémentaires S_j (référencé 15)

sélectionnées parmi les S_i, orientées et de préférence planes. L'intérêt de déterminer un tel sous ensemble est illustré sur la figure 2 : pour un objet O comprenant un coffrage 34 et des ailettes 35, on peut ne considérer que l'objet O' ne comprenant que le coffrage 34 sans les ailettes 35 pour savoir si les points D_i de l'ensemble D sont dans le coffrage 34 et donc dans l'objet O. Le sous ensemble O' est déterminé:

- soit en gardant O' = O (dans ce cas là l'ensemble des S_j correspond à l'ensemble des S_i, et il suffit de remplacer S_j par S_i et O' par O dans la suite de la description),
- soit optionnellement en effectuant un filtre selon les étapes a. et b. suivantes:
  a. on détermine une région R (référencé 16) de P contenant tous les $F(D_i).p$
  b. on détermine le sous-ensemble O' de O tel qu'un élément de O ne faisant pas partie de O' n'a pas de projection par F sur P appartenant à R. Cette étape de tri est utilisée classiquement en informatique pour réduire la durée d'un calcul en l'appliquant localement à un sous-ensemble plus petit (ici les seuls éléments de O qui peuvent avoir une projection dans R).

II. pour tout élément D_i appartenant à D, c'est-à-dire pour chaque point de travail D_i pour lequel on cherche à déterminer s'il est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet O', on détermine une ligne $F\{F(D_i).p\}$ (référencé 12) passant par ce point de travail et on détermine $F(D_i).v$ (référencé 13) la coordonnée curviligne du point de travail D_i le long de $F\{F(D_i).p\}$. Si E est un espace à trois dimensions, on choisit de manière astucieuse comme illustré sur la figure 2:

- l'ensemble D des points de travail D_i pour que ces points D_i soient regroupés dans un plan de travail ou une surface de travail 36, le plan ou la surface 36 correspondant de préférence en une des couches à déposer pour fabriquer le produit par prototypage rapide, et

- chaque ligne $F\{F(D_i).p\}$ de manière à ce qu'elle soit transversale à ce plan ou surface 36 par le point D_i associé à cette ligne.

Ceci permet de maximiser le nombre d'itérations (étape IV décrite par la suite) à paralléliser dans le temps, et peut même permettre d'itérer simultanément dans le temps les opérations pour tous les points de travails (pixels ou voxels) d'une même couche de prototypage rapide.

III. à chaque point de travail D_i, pour lequel on cherche à déterminer s'il est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet O', et donc à toute ligne $F\{F(D_i).p\}$, on associe un compteur dédié uniquement à ce point de travail D_i, noté $F(D_i).c$, et dont la valeur est initialisée à 0.

IV. on itère, sur chacune des surfaces élémentaires S_j, les opérations suivantes : pour tout élément S_j appartenant à O', on note sa normale N_j (référencé 17). Pour tout D_i appartenant à D, on calcule l'intersection entre $F\{F(D_i).p\}$ et S_j. Autrement dit, on recherche une intersection entre la surface élémentaire S_j et la ligne $F\{F(D_i).p\}$ passant par le point de travail D_i :

i. s'il n'y a pas d'intersection, on passe au D_i suivant

ii. s'il y a une intersection I (référencé 18), et si $F(I).v > F(D_i).v$, c'est-à-dire si l'intersection I se trouve au delà de la position du point de travail D_i le long de la ligne $F\{F(D_i).p\}$ par rapport à une origine $F(D_i).v=0$ de la ligne, on passe au D_i suivant

iii. si $F(I).v \leq F(D_i).v$, c'est-à-dire si l'intersection I se trouve avant ou sur la position du point de travail D_i le long de la ligne $F\{F(D_i).p\}$ par rapport à l'origine $F(D_i).v=0$ de la ligne, et :

- si le produit scalaire $\vec{N}_j.\overrightarrow{F(I).n}$ est > 0, c'est-à-dire si la surface S_j est une surface d'entrée de la ligne à l'intérieur de l'objet O', on modifie le compteur $F(D_i).c$ selon une modification d'entrée

(typiquement on incrémente $F(D_i).c$ de 1 unité),

- sinon (si le produit scalaire $\vec{N}_j.\overrightarrow{F(I).n}$ est ≤ 0, c'est-à-dire si la surface S_j est une surface de sortie de la ligne à l'extérieur de l'objet O'), on modifie le compteur $F(D_i).c$ selon une modification de sortie de valeur opposée à la modification d'entrée (typiquement on décrémente $F(D_i).c$ de 1 unité)

V. On déduit l'appartenance de D_i à l'objet O' par le signe de $F(D_i).c$: D_i appartient à O' si et seulement si $F(D_i).c > 0$. Autrement dit, on détermine si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet O' en fonction de la valeur positive ou négative (ou du signe) du compteur $F(D_i).c$ dédié uniquement au point de travail D_i.

La quasi totalité des calculs du procédé selon l'invention s'effectue durant l'étape IV, qui a pour caractéristiques essentielles:

- le calcul peut être simple (en choisissant soigneusement F, on peut par exemple l'implémenter sous forme de l'intersection entre un plan et une droite)
- les opérations élémentaires utilisées (produits scalaires, produits de matrices) sont intrinsèquement vectorielles et donc faciles à paralléliser.
- la durée maximale de l'opération est bornée (pas de boucle), et identique d'une opération à l'autre dès que l'opération a un résultat non trivial (c'est-à-dire si on ne passe pas au D_i suivant).
- les données nécessaires sont peu nombreuses (besoin de S_j et D_i), et totalement indépendantes de résultats d'autres opérations intermédiaires: S_j et D_i sont directement les données du problème à résoudre.

Cet procédé selon l'invention est donc particulièrement bien adapté à une implémentation sous forme SIMD:

- Les instructions du programme sont communes à toutes les tâches parallèles
- Les données ne dépendent d'aucune opération intermédiaire
- La synchronisation est triviale, par simple durée d'exécution fixe

En outre, selon le choix de la position de l'origine et/ou un choix de programmation, les alinéas i. à iii. de l'étape IV peuvent varier, par exemple selon la variante suivante :

i. s'il n'y a pas d'intersection, on passe au D_i suivant

ii. s'il y a une intersection I (référencé 18), et si $F(I).v \leq F(D_i).v$, c'est-à-dire si l'intersection I se trouve avant la position du point de travail D_i le long de la ligne $F\{F(D_i).p\}$ par rapport à une origine $F(D_i).v=0$ de la ligne, on passe au D_i suivant

iii. si $F(I).v > F(D_i).v$, c'est-à-dire si l'intersection I se trouve au-delà de la position du point de travail D_i le long de la ligne $F\{F(D_i).p\}$ par rapport à l'origine $F(D_i).v=0$ de la ligne, et :

- si le produit scalaire $\vec{N}_j.\overrightarrow{F(I).n}$ est > 0, c'est-à-dire si la surface S_j est une surface d'entrée de la ligne à l'intérieur de l'objet O', on modifie le compteur $F(D_i).c$ selon une modification d'entrée (typiquement on incrémente $F(D_i).c$ de 1 unité),
- sinon (si le produit scalaire $\vec{N}_j.\overrightarrow{F(I).n}$ est ≤ 0, c'est-à-dire si la surface S_j est une surface de sortie de la ligne à l'extérieur de l'objet O'), on modifie le compteur $F(D_i).c$ selon une modification de sortie de valeur opposée à la modification d'entrée (typiquement on décrémente $F(D_i).c$ de 1 unité)

Exemple détaillé d'un premier mode de réalisation de l'invention (figure 3)

On va maintenant décrire, en référence à la figure 3, un premier exemple de mise en œuvre de procédé selon l'invention. On se place en vue de coupe, pour simplifier la description par rapport à une vue similaire à celle du figure 2). Dans cet exemple, l'espace E est donc à deux dimensions.

On cherche à savoir si les trois points de D = {D_1 ; D_2 ; ,D_3} appartiennent à O. L'objet O est un rectangle composé des surfaces élémentaires S_1, S_2, S_3 et S_4. Par la suite, on appellera I_i^j l'intersection de la ligne F{F(D_i).p} avec la surface S_j. Le procédé selon l'invention comprend alors les étapes suivantes :

1. Initialisation de tous les F(D_i).c à 0.
2. Calcul de tous les F(D_i).v
3. Traitement de S_1
   a. Traitement de D_1.
      i. Calcul de I_1^1, qui existe
      ii. F(I_1^1).v > F(D_1).v
      iii. $\vec{N}_1.\overrightarrow{F(I_1^1).n}$ est < 0, donc on diminue F(D_1).c de une unité
   b. Traitement de D2
      i. Calcul de I_2^1, qui n'existe pas
   c. Traitement de D3
      i. Calcul de I_3^1, qui n'existe pas
4. Traitement de S_2
   a. Traitement de D_1.
      i. Calcul de I_1^2, qui existe
      ii. F(I_1^2).v > F(D_1).v
      iii. $\vec{N}_2.\overrightarrow{F(I_1^2).n}$ est > 0, donc donc on augmente F(D_1).c de une unité
   b. Traitement de D_2

i. Calcul de I_2^2, qui n'existe pas

c. Traitement de D_3

i. Calcul de I_3^2, qui n'existe pas

5. Traitement de S_3

a. Traitement de D_1.

i. Calcul de I_1^3, qui n'existe pas

b. Traitement de D_2

i. Calcul de I_2^3, qui existe

ii. $F(I_2^3).v > F(D_2).v$

iii. $\vec{N}_3.\overrightarrow{F(I_2^3).n}$ est > 0, donc donc on augmente $F(D_2).c$ de une unité :

c. Traitement de D_3

i. Calcul de I_3^3, qui n'existe pas

6. Traitement de S_4

a. Traitement de D_1.

i. Calcul de I_1^4, qui n'existe pas

b. Traitement de D_2

i. Calcul de I_2^4, qui existe

ii. $F(I_2^4).v < F(D_2).v$

c. Traitement de D_3

i. Calcul de I_3^4, qui n'existe pas

7. Etape finale de détermination : A la fin de l'exécution, on a :

a. $F(D_1).c = 0-1+1= 0$, donc D_1 n'appartient pas à O : le point D1 est à l'extérieur de l'objet O.

b. $F(D_2).c = 0+1= 1$, donc D_2 appartient à O: le point D2 est à l'intérieur de l'objet O.

c. $F(D_3).c = 0$, donc D_3 n'appartient pas à O: le point D3 est à l'extérieur de l'objet O.

Différences et avantages de l'invention par rapport à l'état de la technique antérieure

Pour savoir si un point de E appartient ou non à l'objet O ou O', on n'est pas obligé de calculer de structure intermédiaire (couche, empilement de voxel, etc.), car E peut être directement un espace à 3 dimensions.

Ainsi, si l'objet O est un objet 3D correspondant au produit 3D à fabriquer, il est possible de déterminer quel point de l'espace E est à l'intérieur de l'objet O selon le procédé selon l'invention, puis seulement après de découper cet objet O en couches à déposer les unes après les autres par stéréolithographie, ou dépôt de filament, ou autre. Cela permet notamment d'optimiser le découpage, notamment l'orientation du découpage, en fonction du résultat de la détermination de quel point est situé à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet O.

A l'inverse, il est possible de commencer à découper le produit 3D en couches, chacune des couches constituant alors un objet O à deux dimensions pour lequel on va chercher selon un procédé selon l'invention à déterminer quel point est à l'intérieur de l'objet O.

On ne réutilise pas non plus les résultats de ce calcul pour en déduire quoi que ce soit à propos d'autres points de E. Certes, certaines données sont utilisées dans plusieurs calculs, mais elles constituent les données initiales du problème. Le calcul d'intersection entre $F\{F(D_i).p\}$ et S_j pour tout couple (i,j) fait bien intervenir plusieurs fois un élément j pour tous les éléments i, et inversement. Cependant, ces éléments intervenant plusieurs fois ne sont pas des résultats de calculs mais des données, ce qui fait qu'on n'a pas besoin de synchronisations complexes pour attendre des résultats, ni de séquençage particulier des instructions. Selon l'invention, il n'est pas nécessaire de stocker ou mémoriser l'existence ou les coordonnées des points d'intersections, qui ne sont donc pas stockées.

On remarque en comparant l'invention illustrée sur la figure 3 par rapport à l'état de la technique antérieure de la figure 1, que selon l'invention les lignes $F\{F(D_i).p\}$ peuvent être non parallèles. Dans ce cas, de manière préférentielle, l'ensemble des lignes $F\{F(D_i).p\}$ associés aux points D_i ne se croisent pas à l'intérieur de l'espace E. En référence à la figure 3, le point A est donc situé à l'extérieur de l'espace E.

Une différence majeure par rapport à l'état de la technique antérieure est que selon l'invention chaque compteur est associé à un seul et unique point ou pixel ou voxel, alors que selon l'état de la technique antérieure chaque compteur est associé à un ensemble de pixels alignés sur une ligne 3. Chaque compteur associé à un point est distinct des compteurs associés aux autres points. Autrement dit, selon l'invention, on a au moins autant (autant pour le premier exemple de mode de réalisation voir le double pour le deuxième exemple de mode de réalisation décrit par la suite) de compteur que de point de travail, alors que selon l'état de la technique antérieure on a beaucoup moins de compteur que de points car un seul compteur peut être associé à plusieurs milliers de pixels alignés. Un avantage majeur du procédé selon l'invention est qu'il peut être extrêmement rapide à mettre en œuvre. En effet, selon l'invention, on peut effectuer les calculs relatifs à chaque intersection d'une surface élémentaire S_j avec une ligne passant par un point de travail D_i :

- en parallèle dans le temps (c'est-à-dire simultanément ou sans attendre le résultat d'un autre calcul d'intersection) pour plusieurs voir toutes les surfaces élémentaires S_j, et/ou
- en parallèle dans le temps (c'est-à-dire simultanément ou sans attendre le résultat d'un autre calcul d'intersection) pour plusieurs voir tous les points de travail D_i.

Pour illustrer simplement cet avantage technique :

- selon l'état de la technique antérieure illustré sur la figure 1, comme décrit précédemment, on démarre d'une extrémité de la ligne 3 , et on se dirige vers l'autre bord de la section, en mettant à jour un compteur "nombre d'entrée/sortie dans la matière" ayant pour valeur initiale "0", et à chaque fois qu'on passe sur un pixel, on regarde l'état du compteur: s'il est supérieur à 0, on coche le pixel comme étant dans la matière, et inversement sinon. On comprendra donc aisément qu'il est nécessaire de faire les calculs et la détermination concernant le pixel 19 avant les calculs et la détermination concernant le pixel 20 : il est impossible de faire les calculs pour chaque pixel ou point indépendamment les uns des autres, et on doit nécessairement faire en série les uns après les autres les milliers de calculs correspondant aux milliers de pixels alignés sur une ligne 3.

- à l'inverse, selon le premier exemple de mode de réalisation de l'invention précédemment décrit en référence à la figure 3, plusieurs voir tous les calculs de recherche d'intersection et de détermination de la modification du compteur 3a, 3b, 3c, 4a, 4b, 4c, 5a, 5b, 5c, 6a, 6b, et 6c peuvent être effectuées en parallèle dans le temps, puis plusieurs voir toutes les étapes de détermination 7a, 7b et 7c de si le point de travail D_1, D_2 ou D_3 est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet O peuvent être effectués en parallèle dans le temps.

L'invention est donc particulièrement bien adapté à une implémentation sous forme SIMD:

- Les tâches ou instructions du procédé selon l'invention (encodées au sein d'un programme ou d'un circuit analogique ou numérique dédié ou d'un microprocesseur dédié) pour la recherche d'intersection et la détermination de la modification du compteur sont communes à tous les couples point D_i et surface S_j, et peuvent donc être effectuées en parallèles
- Les données pour ces tâches ou instructions ne dépendent d'aucune opération intermédiaire
- La synchronisation de ces tâches (une tâche représentant une seule étape d'itération, c'est-à-dire un seul ensemble [IVi et IVii et IViii] dans le mode de réalisation venant d'être décrit ou une seule étape VIII.i) ou VIII.ii) dans le mode de réalisation qui va être décrit par la suite) est triviale, par simple durée d'exécution fixe car la durée maximale de ces tâches est bornée (pas de boucle), et identique d'une opération à l'autre dès que l'opération a un résultat non trivial (c'est-à-dire dès qu'il existe une intersection qui implique de modifier un compteur).

Typiquement, voilà comment on procède pour la synchronisation. On définit une borne supérieure de temps, qui est égale à la durée maximale de ces tâches, c'est-à-dire qui est égale à une étape d'itération (numérotée IV dans le mode de réalisation venant d'être décrit ou VIII dans le mode de réalisation qui va être décrit par la suite) pour laquelle il existe une intersection qui implique de modifier un compteur. Après, voilà comment ça se déroule, typiquement au sein d'un processeur :

- au départ, on prépare suffisamment d'informations pour effectuer les (typiquement millions) "d'étapes d'itérations", puis

- on groupe ces étapes d'itérations par surface élémentaire, puis

- on déroule ces étapes d'itérations surface par surface, créant ainsi un grand nombre de petites tâches en file d'attente (typiquement: des millions) ; ces tâches sont réparties sur un nombre de nœuds de calcul (typiquement: des centaines) au fur et à mesure qu'on vide la file d'attente, puis

- lorsque tous les nœuds de calcul sont prêts on les lance tous ensemble. Chaque nœud traite une tâche élémentaire ; puis

- on attend la fin du calcul pour chaque nœud. On définit la durée d'une tâche élémentaire de manière fixe c'est-à-dire constante quelque que soit cette tâche élémentaire, et égale à la borne supérieure de temps. Comme chaque nœud exécute la même tâche sur des données différentes, on définit la durée d'un nœud de manière fixe c'est-à-dire constante quelque que soit le nœud considéré. Ainsi, tous les nœuds prennent le même temps pour s'exécuter, quel que soit le résultat (qu'il y ait une intersection ou pas, qu'on modifie le compteur de calcul ou pas), car on définit la durée d'un nœud de manière fixe. Ainsi, on « synchronise » les tâches ou itérations entre elles par durée d'exécution fixe ; puis

- on itère en re-remplissant les nœuds de calcul et en re-lançant leur exécution simultanée, jusqu'à ce que la file d'attente soit vide.

Il n'y a donc pas de synchronisation complexe qui nécessite de surveiller une fin d'exécution d'itération ou de calcul. On peut prédire le temps total en connaissant la taille de la file d'attente, sans connaitre le résultat individuel des calculs, alors que ce serait nécessaire si la synchronisation était faite par attente de la fin d'exécution des calculs. Ainsi, l'invention va à l'encontre de l'état de la technique antérieure, qui incite à penser qu'il serait utile de dégager des nœuds dont les calculs sont triviaux (pas d'intersection) pour les réallouer à la suite de la file d'attente, en particulier dans le cas dans une machine MIMD. Grâce à l'invention, on peut fonctionner en SIMD, les nœuds triviaux ne sont pas libres, car ils sont forcés à exécuter simultanément l'instruction en cours de la tâche en cours de leur groupe SIMD. Cependant, les performances sont meilleures que si

on réallouait les nœuds affectés à des tâches triviales à des tâches en attente.

Amélioration supplémentaire de l'invention

La connaissance de l'intérieur d'un produit 3D au sens purement mathématique est rarement suffisante pour la bonne fabrication du produit correspondant. Très souvent, des paramètres spécifiques au procédé font que cette information doit être légèrement adaptée. Par exemple en stéréolithographie, en référence à la figure 4, la profondeur de polymérisation 21 d'une couche 22 sur une autre couche 23 précédemment déposée est supérieure à l'épaisseur 24 de cette couche 22 telle que déposée, ceci pour assurer une bonne adhésion entre les couches (c'est la "surpolymérisation"). En référence à la figure 4, la conséquence est que la région solidifiée n'est pas forcément optimale du point de vue du respect des dimensions du produit 3D si on utilise exclusivement l'information décrivant la couche en cours de polymérisation. On voit, sur l'exemple de la figure 4 en coupe de profil pour lesquelles les couches successives sont horizontales, que moins les parois 33 du produit sont verticales, plus les erreurs 25, 26 et 27 de dimensions par rapport aux contours théoriques du produit à fabriquer sont importantes : pour une paroi verticale l'erreur 27 est nulle, pour une paroi proche de la verticale l'erreur 25 est faible, et pour une paroi proche de l'horizontale l'erreur 26 est importante.

La solution traditionnellement utilisée consiste à comparer les sections. C'est une opération complexe, décrite dans le brevet EP 0 555 369 B1. Elle est d'autant plus complexe qu'une information cruciale est perdue lorsqu'on ne manipule que des sections: en effet, l'erreur commise dépend typiquement de l'angle de la paroi par rapport à la verticale (cf. figure 4).

Une amélioration supplémentaire de l'invention permet pourtant de prendre en compte la surpolymérisation, pratiquement sans augmenter le temps de calcul, tout en gérant parfaitement des angles quelconques distribués aléatoirement sur le produit, et en restant facile à implémenter en SIMD.

Dans le cas particulier où pour chaque point D_i la projection F est telle que $F\{F(D_i).p\}$ est une droite, au moins localement (c'est-à-dire dans la

région de l'espace comprenant D_i et O'), l'expression $\vec{N}_j.\overrightarrow{F(I).n}$ utilisée dans l'étape IV.iii décrite ci-dessus se réduit à l'expression $\vec{N}_j.\overrightarrow{F(D_i).n}$, que l'on peut pré calculer et tabuler avant même d'aborder l'étape IV. Si de plus F est telle que tous les $\overrightarrow{F(D_i).n}$ sont identiques (par exemple, si F est une projection orthographique), alors l'expression $\vec{N}_j.\overrightarrow{F(I).n}$ ne dépend plus que de N_j, c'est à dire de la surface S_j en cours de traitement.

On peut alors réécrire l'opération IV ci-dessus sous la forme suivante, en l'appliquant à deux groupes de S_j complémentaires, sans que cela aboutisse à un changement du temps d'exécution (c'est une réorganisation rédactionnelle des mêmes calculs). Si on note N les différents $\overrightarrow{F(D_i).n}$ (tous identiques par hypothèse), on a maintenant, à la place de l'étape IV précédemment décrite, les étapes suivantes:

IV. Pour tout élément S_j appartenant à O', on note sa normale N_j et on divise O' en deux nouveaux sous-ensembles complémentaires O^+ et O^- tels :

i. que le sous ensemble O^+ contienne toutes les S_j (notées S_j^+) de O' dont le produit scalaire N_j.N est positif ou nul, les surfaces élémentaires S_j^+ étant donc des surfaces d'entrée à l'intérieur de l'objet O', et

ii. que le sous ensemble O^- contienne toutes les S_j (notées S_j^-) de O' dont le produit scalaire N_j.N est négatif, les surfaces élémentaires S_j^- étant donc des surfaces de sortie à l'extérieur de l'objet O'.

V. Pour tout élément S_j appartenant à O^+ et pour tout D_i appartenant à D, on calcule l'intersection entre $F\{F(D_i).p\}$ et S_j (rastérisation).

i. s'il y a une intersection I, et si $F(I).v > F(D_i).v$, on incrémente $F(D_i).c$ de 1

VI. Pour tout élément S_j appartenant à O^-

et pour tout D_i appartenant à D, on calcule l'intersection entre $F\{F(D_i).p\}$ et S_j (rastérisation).

i. s'il y a une intersection I, et si $F(I).v > F(D_i).v$, on décrémente $F(D_i).c$ de 1

L'idée consiste à ne plus utiliser un seul ensemble D de points, mais deux, notés D^+ et D^-, et d'appliquer les traitements relatifs à O^+ et O^- sur leur ensemble respectif. En choisissant D^+ et D^- judicieusement, on peut calculer des compensations spécifiques au procédé.

Prenons par exemple le problème de la surpolymérisation dans la stéréolithographie, en référence à la figure 5. L'impact du faisceau solidifie une partie du liquide, selon une forme dépendant de l'angle d'incidence et une profondeur dépendant de la puissance. On définit l'ensemble D^+ (référencé 28) comme celui des points de travail, qui se situent à la surface du liquide d'une couche, et l'ensemble D^- (référencé 29) comme l'ensemble de points à l'extrémité basse des zones polymérisées. Ainsi, à chaque point D_i de D^+, appelé désormais D_i^+ (référencé 30), correspond un point D_i^- (référencé 31) de D^- qui est une image de D_i^+ par translation de D_i^+ vers le bas selon la direction de séparation entre deux couches de stéréolithographie et selon la profondeur de polymérisation 32 d'une couche. Du point de vue de l'algorithme, rien n'impose que D^+ et D^- soient plans, mais dans l'exemple considéré, on a D^+ dans le plan de la surface du liquide, et D^- une surface très légèrement courbée, qui pourrait même être approximée par un plan pour certaines machines dont le dispositif optique s'y prête.

On modifie alors légèrement l'algorithme, qui prend maintenant la forme suivante:

I. De manière optionnelle, on détermine un sous-ensemble O' de O : $O' = \bigcup_j S_j$, de sorte que la description de l'objet O' a pour forme une décomposition de l'objet O' en plusieurs surfaces élémentaires S_j sélectionnées parmi les S_i, orientées et de préférence planes :

- soit en gardant O' = O (dans ce cas là l'ensemble des S_j correspond à l'ensemble des S_i, et il suffit de remplacer S_j par S_i et O' par O dans la suite de la description),
- soit optionnellement en effectuant un filtre:
  i. on détermine une région minimale R de P contenant tous les F(D_i^+).p
  ii. on détermine le sous-ensemble O' de O tel qu'un élément de O ne faisant pas partie de O' n'a pas de projection par F sur P appartenant à R. Cette étape de tri est utilisée classiquement en informatique pour réduire la durée d'un calcul en l'appliquant localement à un sous-ensemble plus petit (ici les seuls éléments de O qui peuvent avoir une projection dans R).

II. On construit l'ensemble D^- de points images D_i^- à partir de l'ensemble D^+ de points D_i^+ ayant une projection par F et dont on veut savoir individuellement s'ils doivent être sélectionnés pour la fabrication du produit, selon une loi spécifique du procédé de fabrication impliquant la présence simultanée dans l'objet O' du point considéré D_i^+ et d'un point dérivé (ou image) D_i^- (typiquement par translation de chaque D_i^+ selon la profondeur de polymérisation comme précédemment décrit). On note D^- l'ensemble constitué des points dérivés (ou images) D_i^- de chacun des points D_i^+ de D^+.

III. pour tout élément D_i^+ appartenant à D^+, c'est-à-dire pour chaque point de travail D_i^+ pour lequel on cherche à déterminer s'il est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet O', on calcule ou détermine :

- une ligne F{F(D_i^+).p} passant par le point de travail D_i^+ , et

- F(D_i^+).v la coordonnée curviligne du point de travail D_i^+ le long de F{F(D_i^+).p}.

IV. à tout D_i^+ pour lequel on cherche à déterminer s'il est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet O', et donc à toute ligne F{F(D_i^+).p}, on associe un compteur, noté F(D_i^+).c, dédié uniquement à ce point de travail D_i^+. La valeur de ce compteur est initialisée à 0

V. pour tout point image D_i^- appartenant à D$^-$, on calcule ou détermine :

- une ligne F{F(D_i^-).p} passant par le point D_i^- dérivé ou image de D_i^+, de préférence confondue avec la ligne F{F(D_i^+).p}, et
- F(D_i^-).v la coordonnée curviligne du point D_i^- le long de F{F(D_i^-).p}

VI. à tout D_i^-, et donc à toute ligne F{F(D_i^-).p}, on associe un compteur, noté F(D_i^-).c, , dédié uniquement à ce point dérivé ou image D_i^-. La valeur de ce compteur est initialisée à 0.

VII. Pour tout élément S_j appartenant à O', on note sa normale N_j et on crée deux nouveaux sous-ensembles O$^+$ et O$^-$ tels que O$^+$ contienne les S_j de O' dont le produit scalaire N_j.N est positif ou nul, et O$^-$ tous les autres. Autrement dit, on sépare les surfaces élémentaires en deux groupes distincts, un groupe O$^+$ de surfaces S_j^+ d'entrée dans l'objet O' et un groupe O$^-$ de surfaces S_j^- de sortie de l'objet O', l'entrée et la sortie dans l'objet O' étant définie par rapport à une direction de déplacement 32.

VIII. Après, on itère sur chacune des surfaces élémentaires S_j les opérations suivantes :

i) Pour tout élément S_j appartenant à O$^+$ c'est-à-dire si la surface S_j est une surface d'entrée S_j^+, et pour tout D_i^+ appartenant à D$^+$,

on recherche et calcule l'intersection entre cette surface élémentaire S_j^+ et la ligne F{F(D_i^+).p} passant par le point de travail D_i^+. En outre, s'il cette intersection I existe, et si F(I).v > F(D_i^+).v, on modifie le compteur F(D_i^+).c selon une modification de passage à travers la surface (typiquement on incrémente F(D_i^+).c de une unité)

ii) Pour tout élément S_j appartenant à O^- c'est-à-dire si la surface S_j est une surface de sortie S_j^-, et pour tout D_i^- appartenant à D^-, on recherche et calcule l'intersection entre cette surface élémentaire S_j^- et la ligne F{F(D_i^-).p} passant par le point image D_i^-. En outre, si cette intersection I existe, et si F(I).v > F(D_i^-).v, on modifie le compteur F(D_i^-).c selon la modification de passage à travers la surface (typiquement on incrémente F(D_i^-).c de 1).

IX. Pour chaque point de travail D_i^+, on détermine si ce point de travail D_i^+ est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet O' en fonction du compteur dédié au point de travail D_i^+ et du compteur dédié à l'image D_i^- du point de travail. Plus exactement, pour chaque point de travail D_i^+, on détermine si ce point de travail D_i^+ est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet O' par comparaison du compteur dédié au point de travail D_i^+ et du compteur dédié à l'image D_i^- du point de travail. On sélectionne :

- les D_i^+ satisfaisant la condition "F(D_i^+).c > F(D_i^-).c " comme étant des points de travail situés à l'intérieur de l'objet O',
- les autres points D_i^+ (pour lesquels F(D_i^+).c ≤ F(D_i^-).c) comme étant des points de travail situés à l'extérieur de l'objet O'.

Exemple détaillé (figure 6)

En référence à la figure 6, une vue en coupe montre comment on peut mettre à profit ce procédé selon l'invention amélioré pour ne polymériser un point D_i^+ que si D_i^+ et son D_i^- correspondant sont tous deux dans la matière. Le procédé selon l'invention comprend dans cet exemple les étapes suivantes :

1. Initialisation de tous les F(D_i^+).c à 0.
2. Calcul de tous les F(D_i^+).v
3. Initialisation de tous les F(D_i^-).c à 0.
4. Calcul de tous les F(D_i^-).v
5. Traitement de S_1^+
    a. Traitement de D_1^+ .
        i. F(I_1^+).v > F(D_1^+).v, donc on augmente F(D_1^+).c de 1
    b. Traitement de D_2^+
        i. F(I_2^+).v > F(D_2^+).v, donc on augmente F(D_2^+).c de 1
    c. Traitement de D_3^+
        i. F(I_3^+).v < F(D_3^+).v, donc F(D_3^+).c inchangé
6. Traitement de S_1^-
    a. Traitement de D_1^- .
        i. F(I_1^-).v < F(D_1^-).v, donc F(D_1^-).c inchangé
    b. Traitement de D_2^-
        i. Pas d'intersection entre S_1^- et F{F(D_2^-).p}
    c. Traitement de D_3^-
        i. Pas d'intersection entre S_1^- et F{F(D_3^-).p}
7. Traitement de S_2^-
    a. Traitement de D_1^- .
        i. Pas d'intersection entre S_2^- et F{F(D_1^-).p}

b. Traitement de D_2^-

i. F(I_2^-).v > F(D_2^-).v, donc on augmente F(D_2^-).c de 1

c. Traitement de D_3^-

i. F(I_3^-).v < F(D_3^-).v, donc F(D_3^-).c inchangé

A la fin de l'exécution, on a :

- (F(D_1^+).c =0+1=1)> (F(D_1^-).c =0), donc D_1 est sélectionné comme étant situé à l'intérieur de l'objet O.
- (F(D_2^+).c =0+1=1)= (F(D_2^-).c =0+1=1), donc D_2 n'est pas sélectionné comme étant situé à l'intérieur de l'objet O.
- (F(D_3^+).c = 0) = (F(D_3^-).c = 0), donc D_3 n'est pas sélectionné comme étant situé à l'intérieur de l'objet O.

Bien sûr, l'invention n'est pas limitée aux exemples qui viennent d'être décrits et de nombreux aménagements peuvent être apportés à ces exemples sans sortir du cadre de l'invention.

REVENDICATIONS

1. Procédé pour fabriquer un produit, comprenant une détermination de si des points (11 ; 30) d'un espace fini sont à l'intérieur ou à l'extérieur d'un objet (14 ; 6) décomposé en surfaces élémentaires (15), ledit objet correspondant au produit à fabriquer ou à une partie ou couche ou tranche du produit à fabriquer,

caractérisé en ce que pour chaque point de travail (11, 30) pour lequel on cherche à déterminer s'il est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet, le procédé comprend :

- une détermination d'au moins une ligne (12) parmi une ligne passant par ce point de travail (11 ; 30) auquel est associé un compteur dédié uniquement à ce point de travail, et une ligne passant par une image (31) du point de travail à laquelle est associé un compteur dédié uniquement à cette image du point de travail, et
- une itération, sur chacune des surfaces élémentaires, des opérations suivantes :
    - une recherche d'une intersection entre la surface élémentaire (15) et une des lignes parmi la ligne (12) passant par le point de travail (11 ; 30) et la ligne passant par l'image du point de travail (31),
    - une modification du compteur si l'intersection existe, et
- une détermination de si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet en fonction du compteur dédié uniquement au point de travail (11 ; 30)

chacune des étapes précédentes étant mise en œuvre par au moins un ordinateur, une unité centrale ou de calcul, un circuit électronique analogique, un circuit électronique numérique, un microprocesseur, et/ou des moyens logiciels.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que:

- la détermination d'au moins une ligne comprend une détermination d'une ligne passant par le point de travail auquel est associé un compteur dédié uniquement à ce point de travail,

- l'itération comprend une itération, sur chacune des surfaces élémentaires, des opérations suivantes :
    - une recherche d'une intersection entre la surface élémentaire et la ligne passant par le point de travail,
    - une modification du compteur si l'intersection existe, et
- la détermination de si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet comprend une détermination de si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet en fonction de la valeur du compteur dédié uniquement au point de travail.

3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que la ligne passe par une origine, et en ce que la modification du compteur comprend :

- Si l'intersection est située au delà du point de travail par rapport à l'origine de la ligne, pas de modification du compteur, et
- Si l'intersection est située non au delà du point de travail par rapport à l'origine de la ligne, une modification du compteur de façon différente selon que l'intersection de la ligne correspond à une entrée de la ligne dans l'objet ou une sortie de la ligne hors de l'objet par rapport à l'origine.

4. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que:

- la détermination d'au moins une ligne comprend une détermination d'une ligne passant par le point de travail auquel est associé un compteur dédié uniquement à ce point de travail et d'une ligne passant par une image du point de travail à laquelle est associé un compteur dédié uniquement à cette image du point de travail,
- le procédé comprend en outre une séparation des surfaces élémentaires en deux groupes distincts, un groupe de surfaces d'entrée dans l'objet et un groupe de surfaces de sortie de l'objet par rapport à une direction de déplacement,
- l'itération comprend une itération, sur chacune des surfaces élémentaires, des opérations suivantes :

- si la surface est une surface d'entrée, une recherche d'une intersection entre cette surface élémentaire et la ligne passant par le point de travail et une modification du compteur associé au point de travail si l'intersection existe,
- si la surface est une surface de sortie, une recherche d'une intersection entre cette surface élémentaire et la ligne passant par l'image du point de travail, et une modification du compteur associé à l'image du point de travail si l'intersection existe,

- la détermination de si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet comprend une détermination de si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet en fonction du compteur dédié au point de travail et du compteur dédié à l'image du point de travail.

5. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que la détermination de si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet en fonction du compteur dédié au point de travail et du compteur dédié à l'image du point de travail comprend une comparaison du compteur dédié au point de travail et du compteur dédié à l'image du point de travail.

6. Procédé selon la revendication 4 ou 5, caractérisé en ce que pour l'ensemble des points de travail et des images des points de travail, les lignes passant par ces points sont parallèles.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que pour l'ensemble des points de travail et des images des points de travail, les lignes passant par ces points ne sont pas parallèles.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que pour l'ensemble des points de travail et des

images des points de travail, les lignes passant par ces points ne se croisent pas à l'intérieur de l'espace fini.

9. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'espace est un espace à trois dimensions.

10. Procédé selon la revendication 9, caractérisé en ce que les points de travail (11) sont regroupés dans une surface de travail (36), et en ce que chaque ligne (12) passant par un point de travail et chaque ligne passant par une image d'un point de travail est transversale à cette surface de travail (36) par ce point de travail (11).

11. Procédé selon la revendication 10, caractérisé en ce que la surface de travail (36) correspond à une couche ou au moins à une partie d'une couche à déposer pour fabriquer le produit par prototypage rapide.

12. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que l'espace est un espace à deux dimensions

13. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'étape d'itération est effectuée en parallèle dans le temps pour plusieurs surfaces élémentaires.

14. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que pour au moins une surface élémentaire, l'étape d'itération est effectuée en parallèle dans le temps pour plusieurs points de travail.

15. Procédé selon l'une quelconque des revendications 13 ou 14, caractérisé en ce que les étapes d'itérations effectuées en parallèles sont synchronisées par durée d'exécution fixe.

16. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend en outre, une fois que l'on a déterminé quel point de l'espace est situé à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet, une fabrication du produit

17. Dispositif pour fabriquer un produit mettant en œuvre un procédé selon l'un quelconque des revendications précédentes, comprenant des moyens pour déterminer si des points d'un espace fini sont à l'intérieur ou à l'extérieur d'un objet décomposé en surfaces élémentaires, ledit objet correspondant au produit à fabriquer ou à une partie ou couche ou tranche du produit à fabriquer,

caractérisé en ce que pour chaque point de travail pour lequel on cherche à déterminer s'il est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet, le dispositif comprend :

- des moyens pour déterminer au moins une ligne parmi une ligne passant par ce point de travail auquel est associé un compteur dédié uniquement à ce point de travail, et une ligne passant par une image du point de travail à laquelle est associé un compteur dédié uniquement à cette image du point de travail, et
- des moyens pour itérer, sur chacune des surfaces élémentaires, les opérations suivantes :
    - une recherche d'une intersection entre la surface élémentaire et une seule des lignes parmi la ligne passant par le point de travail et la ligne passant par l'image du point de travail,
    - une modification du compteur si l'intersection existe, et
- des moyens pour déterminer si le point de travail est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet en fonction du compteur dédié uniquement au point de travail,

chacun des moyens précédents comprenant au moins un ordinateur, une unité centrale ou de calcul, un circuit électronique analogique, un circuit électronique numérique, un microprocesseur, et/ou des moyens logiciels.

18. Dispositif selon la revendication 17, caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens pour fabriquer, une fois que l'on a déterminé quel point de l'espace est situé à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet, le produit.

19. Produit obtenu par un procédé de fabrication selon l'une quelconque des revendications 1 à 16 ou par un dispositif de fabrication selon la revendication 17 ou 18.