



LMCS 2014

Logiciels pour la modélisation et le calcul scientifique

Vendredi 4 avril 2014, site d'EDF à Chatou (78), France

Conférencier : Gilles GONON

Organisme : Acsystème

Mise au point d'un algorithme de palettisation 3D hétérogène en ligne

Contexte du projet

La palettisation automatique est une étape importante de la chaîne de robotisation qui trouve actuellement de nombreuses applications dans les cas suivants :

- préparation de commande
- palettisation en ligne de produits identiques (mono-référence),
- optimisation de plan de palettisation multi-références pour des productions avec un ordre établi.

Il existe actuellement peu de solutions pour traiter le problème de l'empilage en ligne de produits avec des tailles hétérogènes et aléatoires. Avec la complexification des procédés de production, la demande de solutions pour empiler des produits hétérogènes de manière adaptative est grandissante.

Acsystème travaille depuis plusieurs années sur la mise au point d'algorithmes innovants pour répondre à cette problématique de palettisation hétérogène en ligne. Nous avons développé une solution modulaire permettant de gérer des cas et des contraintes différentes d'empilage.

Cette solution d'empilage a été déclinée dans deux cas de production où les pièces arrivent en ligne pour être palettisées, et où la visibilité sur les pièces à venir n'est que de quelques pièces :

- les meubles sur mesure Fournier (Mobalpa) : les pièces sur mesure sont découpées suivant une optimisation puis passent dans une plaqueuse qui les mélange aléatoirement. Elles doivent alors être empilées pour être emmenées vers d'autres ateliers (perçage, rainurage, ...). Les pièces sont toutes de la même épaisseur ce qui permet de construire une palette couche par couche en optimisant le remplissage des couches.
- Fimec TECHNOLOGIES, spécialiste de l'équipement des centres de logistique. Dans le cadre de l'équipement de centres de tris, Fimec TECHNOLOGIES souhaite pouvoir automatiser l'ensemble de sa chaîne logistique (convoyeurs, aiguillage de colis, etc., jusqu'à la palettisation). Or, à l'origine du projet, l'ensemble des éléments de cette chaîne pouvaient être automatisés, à l'exception de la partie de palettisation des colis du fait de l'hétérogénéité des colis.

Présentation de la problématique

La problématique scientifique principale de ce projet est de réaliser un empilage 3D stable de colis rectangulaires de tailles hétérogènes et aléatoires. La thématique générale de recherche autour de cette problématique est celle du bin-packing 3D qui tient du domaine de la recherche opérationnelle. Les problèmes de types bin-packing sont connus comme étant NP-complets, c'est-à-dire que la complexité combinatoire du problème augmente de manière exponentielle avec le nombre de colis à empiler et qu'un problème de taille standard ne peut être résolu de manière optimale en un temps satisfaisant

dans la plupart des applications. L'approche de résolution choisie consiste généralement à trouver une bonne solution au problème plutôt que la solution optimale.

Les applications typiques du bin-packing 3D qui sont aujourd'hui utilisées dans l'industrie avec des solutions très satisfaisantes sont celles du remplissage de containers, de l'optimisation de plans de palettisation avec des colis de tailles semblables ou encore de la préparation de commandes. Dans ces cas, l'ensemble des colis est connu à l'avance et on cherche le rangement optimal qui va permettre de réduire le nombre de containers ou de palettes. Dans le cas des plans de palettisation, la stabilité joue également un rôle important dans la solution retenue, mais elle ne nécessite pas d'être calculée précisément.

Dans nos travaux, l'empilage doit être réalisé « au fil de l'eau », sans connaissance de l'intégralité de la commande. On ne dispose que d'une visibilité variable (typiquement entre 5 et 30 colis) sur les colis arrivant. L'objectif est de réaliser des palettes les plus remplies et les plus stables possible.

Les points techniques pour lesquels des verrous ont été identifiés et sur lesquels nous avons travaillé, sont les suivants :

- les critères de construction pertinents pour obtenir des piles stables et viables à leur transport (après filmage éventuel) ;
- la définition d'une fonction de mérite, combinant les critères précédents ;
- la définition d'un objectif global d'optimisation ;
- le calcul/vérification de la stabilité pour l'ensemble des solutions à tester ;
- la rapidité du temps de cycle.

Environnement de simulation

Le simulateur est en charge de reproduire le fonctionnement de l'algorithme au sein de la machine afin d'en évaluer les performances. Il doit permettre de paramétrer aussi bien l'algorithme d'empilage que différentes configurations de machines ou différents scénarios d'empilage.

En fin de simulation, une synthèse des résultats peut être générée au format Excel pour analyser et comparer les résultats.

Nous avons utilisé Matlab pour réaliser les fonctions d'empilage et le simulateur pour mettre au point les stratégies d'empilage en bénéficiant d'interface de visualisation avancées. Le Matlab Compiler nous a permis de compiler directement les fonctions d'empilage sous forme de DLL sans développement additionnel.

Mise au point des stratégies

Principe des heuristiques constructivistes

Toutes les stratégies actuellement envisagées sont basées sur la même méthode dite « constructiviste ». C'est-à-dire que l'on construit la pile pièce par pièce en cherchant la pièce qui prendra la meilleure position parmi l'ensemble des pièces visibles sur un ensemble de « position possibles » pour le placement.

Pour toutes les stratégies, on étudie le placement des pièces visibles sur une série de « points possibles » situés en bas à gauche de la pièce :

- pour chaque pièce en chaque point possible on calcule un score,
- on place la pièce qui obtient le score minimal parmi l'ensemble des scores calculés.

Chaque stratégie propose une fonction de score différente, on appelle la fonction qui calcule le score la « fonction de mérite ».

La mise au point des stratégies consiste à développer des critères et à les combiner dans la fonction de mérite pour obtenir les piles les plus compactes et les plus stables possibles.

Les critères ont été établis comme une formulation mathématique de règles implicites ou explicites que suivrait un opérateur manuel pour empiler des panneaux. Quelques exemples des critères utilisés sont formulés ci-dessous. Pour une nouvelle pièce à placer, on souhaite que :

- elle recouvre le plus de pièces possibles, le chevauchement entraînant une plus grande stabilité de la palette,

- elle s'aligne en hauteur avec les pièces déjà en place sur la palette, afin de permettre la constitution de « couches » pour rendre possible le chevauchement des pièces supérieures,
- elle s'aligne en largeur et longueur avec les pièces déjà en place sur la palette afin d'augmenter la surface rectangulaire disponible pour placer les pièces suivantes,
- la pièce soit dans la position la plus stable possible et la plus stabilisante pour la pile,
- elle soit la plus basse possible sur la pile pour que la pile se construise de manière compacte de bas en haut.
- ...

Critères de performances

Les performances de l'empilage sont principalement basées sur la compacité d'empilage. Elles sont évaluées pour une liste de pièce suivant les critères :

- nombre de palettes nécessaires à l'empilage de la liste de pièces,
- puis pour chaque palette :
 - nombre de pièces sur la palette
 - volume utilisé, en m³ (volume du parallélépipède englobant)
 - taux de remplissage des palettes : volume des pièces par rapport au volume max, en %
 - compacité de la solution : volume des pièces par rapport au volume du parallélépipède englobant les pièces sur la palette, en %.
 - temps moyen de traitement d'un colis.

Optimisation des fonctions de mérite

Nous utilisons une phase d'optimisation visant à étudier l'influence des différents critères sur le résultat final d'empilage et à en proposer une optimisation.

Pour cela, il nous faut définir une « fonction objectif » calculant un score global pour l'empilage à minimiser. Ce score est calculé pour une série de piles (typiquement 1 fichier de simulation). Le score d'empilage que nous avons choisi est calculé à partir de deux critères :

- le volume perdu en m³ sur une palette par rapport à son gabarit max, dVolumePerdu, calculé comme le volume max de la palette moins le volume des colis présents dessus,
- le taux de compacité en hauteur des pièces posées sur une palette, calculé comme le rapport entre le volume des colis placé sur la palette divisé par le volume parallélépipédique englobant les colis de la surface de la palette (surface palette * hauteur max des colis), txCompaciteZ

L'optimisation est réalisée à l'aide d'algorithmes génétiques car la fonction objectif n'est pas du tout continue (on ne peut pas calculer de dérivée du score pour 2 valeurs proches des coefficients de la fonction de mérite). Ces algorithmes sont mieux à même de gérer la combinaison des coefficients, tout en proposant une variation aléatoire des coefficients pouvant faire évoluer les performances.

Ces phases d'optimisation sont assez longues, de un à plusieurs jours de simulation. Elles ouvrent cependant la perspective d'adapter automatiquement les stratégies d'empilage à une typologie de colis.

Tests et déploiement de la solution d'empilage

Résultats des tests

Notre solution actuelle compte une dizaine de critères. Une série de tests a été menée pour comparer les résultats d'empilage de différentes stratégies sur des fichiers avec des typologies de colis différentes :

- fichier de plusieurs centaines de pièces générées aléatoirement suivant un spectre de distribution des tailles de colis,
- fichiers de cartons existants (environ 50) pour pouvoir tester en réel les solutions obtenues.

La méthodologie adoptée pour les tests est la suivante :

- lancement des simulations en batch pour générer l'ensemble des piles des différents fichiers et des différentes stratégies à tester,
- analyse des piles obtenues :
 - dans un premier temps on regarde l'ensemble des piles obtenues sur le cas avec plusieurs centaines de pièces qui donne un aperçu représentatif des qualités et défauts de l'empilage,
 - vérification du bon fonctionnement sur les fichiers plus petits qui correspondent à des cas un peu particuliers de fonctionnement, car la visibilité chute rapidement à la moitié de la palette ce qui entraîne une dégradation des performances.

- si les résultats sont satisfaisant, choix de la meilleure stratégie
- sinon, relancer une optimisation ou modifier manuellement les stratégies pour influencer un critère particulier

En quelques itérations avec le client, nous sommes arrivés à un résultat qualitativement satisfaisant pour réaliser l'empilage de colis générés aléatoirement.

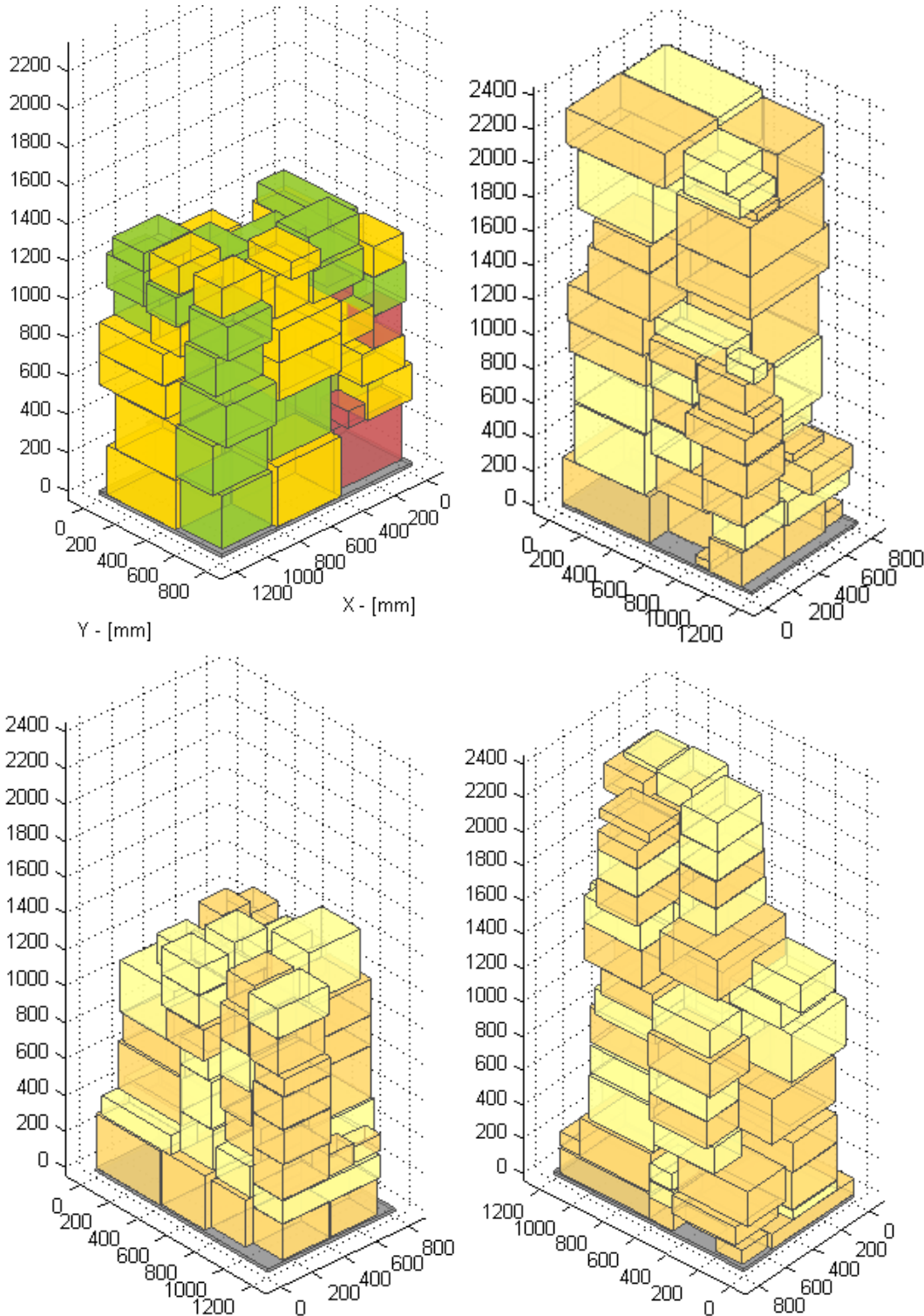


Figure 1 : exemples d'empilages obtenus sur différentes typologies de colis

Compilation et tests sur la cellule robotisée

La DLL a été compilée depuis Matlab en utilisant la toolbox « Matlab Compiler » qui permet de générer à partir du code Matlab un programme « stand-alone » ou une DLL. Il n'y a donc pas de développement additionnel pour le déploiement en production des fonctions d'empilage.

La DLL est simplement installée sur le PC de supervision et appelée directement par le programme de supervision de la cellule robotisée afin de tester l'algorithme d'empilage.

Les premiers tests nous ont permis de valider la correspondance entre les résultats de simulations et les résultats réels d'empilage.

Un des avantages de cette approche est de pouvoir intégrer les améliorations logicielles des stratégies d'empilage sans développement additionnels sur la cellule robotisée.

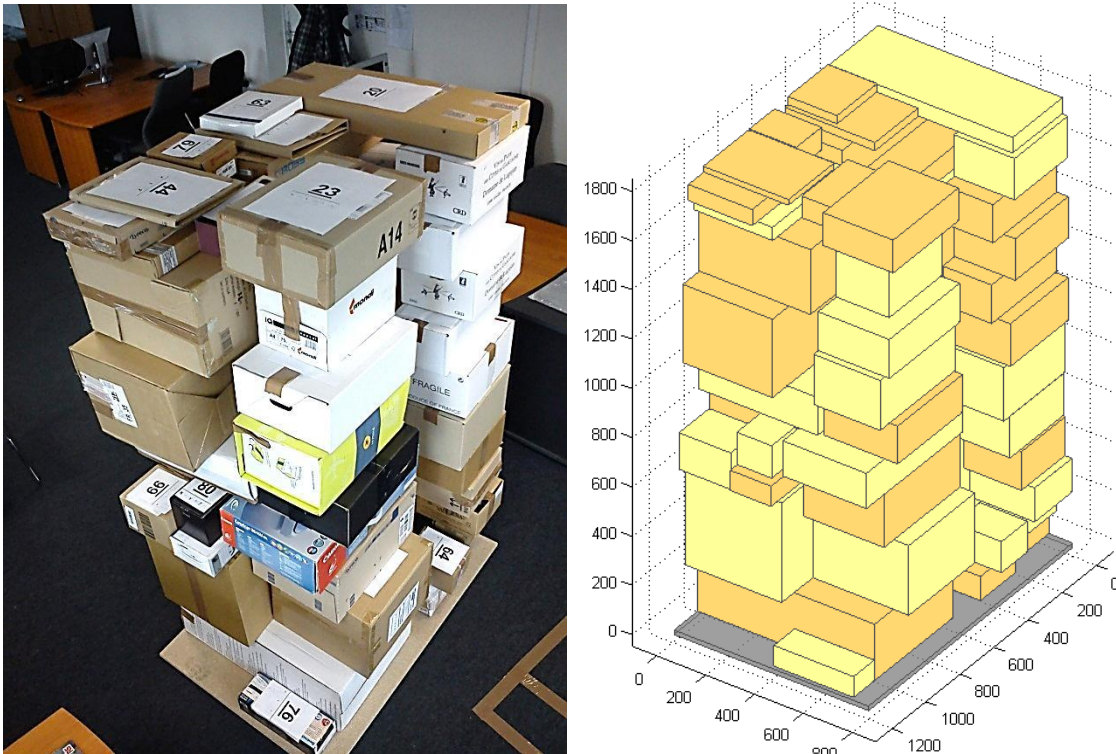


Figure 2 : comparaison de la première pile de l'algorithme : réalisation manuelle et visualisation Matlab