

JOURNÉES D'ÉTUDES

GAMMES AUTOMATIQUES EN FABRICATION MECANIQUE

Ces deux journées d'études doivent permettre aux responsables méthodes-fabrication de faire le point sur les réalisations françaises et étrangères dans le domaine de la conception automatique des gammes de fabrication mécanique. Plusieurs réalisations opérationnelles seront exposées, les débats successifs permettront de mieux cerner la fiabilité et la rentabilité des systèmes proposés.

PROGRAMME

LUNDI 24 SEPTEMBRE

- 9 h 15 Accueil des participants
- 9 h 30 Les systèmes TAUPROG TE et T par MM. LAJOS BALINT et TIBOR TOTH de G.T.I. Budapest (Hongrie)
- 12 h 30 Déjeuner
- 14 h 30 Optimisation des montages d'usinage et application au contrôle automatique, par MM. BOURDET et CLEMENT, de l'E.N.S.E.T. (Paris)
- 15 h 30 Les Gammes Automatiques en Grande Série, par MM. BRIAND et PERRARD, de l'E.N.I. de Saint-Etienne
- 17 h 00 Les problèmes de classification des pièces, par M. GILET, du L.C.A. (Paris)

MARDI 25 SEPTEMBRE

- 9 h 15 Les systèmes AUTOPROS et AUTOPLAN présentés par KONGSBERG (Norvège)
- 11 h 00 Ebauche automatisée des gammes, par M. DUCHAMP, de l'E.N.S.A.M. (Paris)
- 12 h 30 Déjeuner
- 14 h 30 Idées de base, Chiffreur automatique version tour en vue d'une conception assistée par ordinateur des gammes de fabrication, par M. PUN, de l'Université de Bordeaux
- 16 h 00 Gammes automatiques de production, par M. HALEVY, de l'Université de Tel-Aviv (Israël)
- 17 h 30 Méthode de classification de pièces de tournage. Expérience de l'industrie mécanique belge, par M. Luc SOETE, du Centre de Recherches de l'industrie des fabrications métalliques de Belgique.

PARTICIPATION AUX FRAIS : 300 F. par personne

Ce montant couvre les frais d'organisation, la documentation complète, les repas de midi.

CONDITIONS DE REGLEMENT : Par chèque ou par virement à l'ordre de l'Association Nationale des Ingénieurs E.N.I. - Groupe régional de Tarbes - C.C.P. 2094-13 P Toulouse.

Groupe de Travail
« Gamme Automatique »
de l'AD.E.P.A.

C.F.C.

E.N.I.

**gammes
automatiques
en
fabrication
mécanique**

**24-25 Septembre 1973
à TARBES**
(Hautes-Pyrénées)

Association
pour le
Développement
de la
Production Automatisée
15 rue G. Boissier
75015 PARIS

Centre de Formation
Continue
E.N.I.
Chemin d'Azeriaux
65013 TARBES

OPTIMALISATION DES MONTAGES D'USINAGE

Par P. BOURDET et A. CLEMENT, Professeurs à
l'Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement
Technique

Le but de nos recherches est la maîtrise des phénomènes aléatoires intervenant dans la mise en position d'une série de pièces dans un montage de contrôle et dans un montage d'usinage .

A la suite des travaux de Lord Kelvin et de Maxwell on utilise toujours actuellement le modèle dit : de l'isostatisme. Ce modèle est universellement employé pour les pièces indéformables; disons brièvement qu'il consiste dans le cas d'une mise en position par contacts ponctuels unilatéraux à prendre 6 de ces contacts sur la pièce de telle manière que les 6 normales ne constituent pas un complexe de droites et que d'autre part, chaque normale s'oppose "frontalement aux mouvements possibles " déterminés par le complexe des 5 autres normales . (Règle de Maxwell)

L'emploi systématique de ce modèle, s'il a apporté un progrès considérable, est notoirement insuffisant pour les travaux de précision en série .

En effet les écarts proviennent de 2 sources différentes:

- 1) Pour une pièce donnée de la non-répétitivité de la mise en position par modification des états de surfaces
- 2) Pour une série de pièces par les écarts dimensionnels de chaque pièce (Histoire de la pièce)

Par suite de ces écarts, la mise en position d'une pièce n'est jamais rigoureuse et de plus les défauts semblent aléatoires car leurs origines sont mal connues et de ce fait, on ne peut pas prévoir la variabilité du repérage .

Le nouveau modèle que nous proposons englobe le modèle de Kelvin et tient compte des défauts révélés par l'analyse précédente.

On suppose a présent que chaque pièce présente par rapport au modèle géométrique de définition des écarts, soit dimensionnels, soit d'orientation, soit d'état de surface.

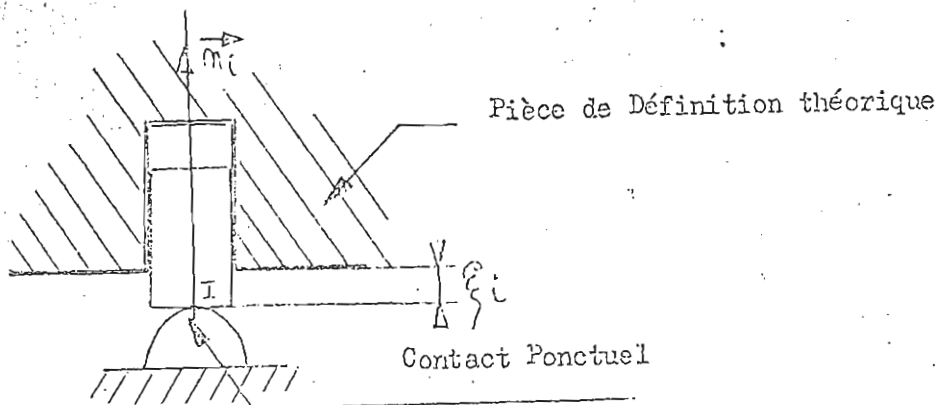
Et l'on pose en principe que la variabilité de la mise en position d'une série de pièces dans un montage donné est la conséquence d'un effet d'amplification par le montage, des écarts dimensionnels antérieurs de chaque pièce. L'étude de cet effet d'amplification comporte deux étapes:

a) Pour un montage d'usinage donné, c'est-à-dire, pour un amplificateur donné, déterminer sa variabilité.

b) Pour une pièce donnée, déterminer le montage d'usinage qui donne une amplification minimum.

DETERMINATION DE LA VARIABILITE D'UN MONTAGE D'USINAGE

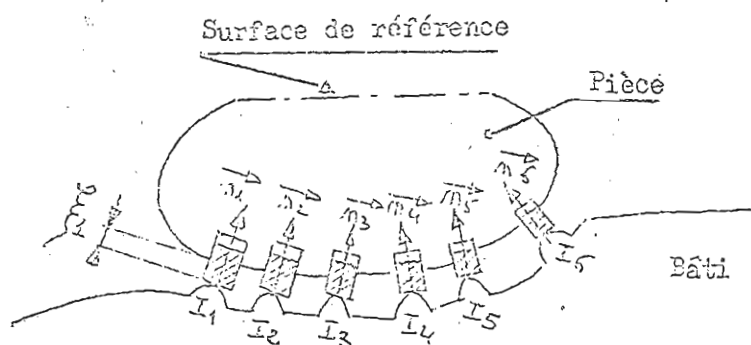
Pour représenter globalement les différents écarts, on adopte le modèle suivant :



Elle représente la somme de tous les écarts possibles au point I, de la pièce réelle par rapport à la pièce de définition théorique. Par suite, la pièce réelle est représentée par la pièce théorique, à laquelle on adjoint les écarts ξ_i en chacun des 6 contacts ponctuels. Cette pièce peut prendre dans l'espace différentes positions selon les différentes combinaisons de valeurs des ξ_i .

Selon la disposition des 6 contacts ponctuels (facteurs d'amplification plus ou moins grands) et selon les valeurs des ξ_i (grandeurs d'entrées soumises à l'amplification) la surface de référence de la pièce, occupera différentes positions dans l'espace. L'enveloppe de ces positions détermine un intervalle de variabilité qui constitue la grandeur de sortie.

La mise en équation du problème est simple. On considère le mécanisme schématisé ci-dessous et conforme au modèle d'étude proposé:



9

Pour un ensemble $(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5, \xi_6)$ d'écartes connues (il s'agit en effet soit des tolérances de fonderie, soit des tolérances provenant des usinages antérieurs) le champ des déplacements très petits de la pièce est tel que :

$$\vec{D}(I_i) \cdot \vec{N}_i = \xi_i \quad i \in \{1, 2, \dots, 6\}$$

On obtient ainsi un système de 6 équations linéaires à 6 inconnues $(\alpha, \beta, \gamma, u, v, w)$. Ces 6 inconnues sont les éléments de réduction du torseur déplacement de la pièce. On sait en effet que des déplacements infiniment petits, constituant un espace vectoriel, sont proportionnels aux vitesses des points du solide.

Un programme d'ordinateur, réalisé dans le cadre d'un contrat de recherche de la D.R.M.E en collaboration avec M. Gilet du Laboratoire Central de l'Armement, permet de calculer ces déplacements et d'en déduire l'intervalle de tolérance sur la position de la surface de référence.

La vérification expérimentale au laboratoire de l'E.H.S.P.T. donne une très bonne concordance entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées. Il ne nous a pas encore été possible d'effectuer une vérification en vraie grandeur sur une production de série.

Tel qu'il est actuellement, ce programme permet un gain de temps important dans la phase de mise au point d'un montage d'usinage, puisqu'il permet d'opter entre plusieurs solutions possibles; ceci est particulièrement intéressant dans le cas de machine à commande numérique, le temps de mise au point expérimentale étant diminué. Sur le plan économique, on doit pouvoir resserrer l'étendue de la dispersion de la production sans frais supplémentaires.

CRITERE DE QUALITE D'UN REPÉRAGE ISOSTATIQUE

On se propose à présent de déterminer des coefficients Q_i , appelés: coefficients de qualité, grâce auxquels il sera possible de caractériser un montage isostatique donné. Ces coefficients de qualité Q_i représenteront les propriétés d'amplification du montage.

Si l'on prend 5 contacts ponctuels parmi les 6 constituant le repérage, on peut leur associer un ensemble de torseurs cinématiques puisqu'alors le système présente un degré de liberté. Classiquement, cet ensemble de torseurs est déterminé par le système de 5 équations:

$$\vec{M}_i(A_i) + \sqrt{5} \vec{M}_i = 0 \quad i \in \{1, 2, \dots, 5\}$$

Cet ensemble constitue une classe d'équivalence des torseurs homothétiques. Habituellement on choisit comme représentant de la classe, celui dont le module du vecteur rotation est égal à 1. Pour des raisons qui apparaîtront par la suite et pour ne pas dénaturer la portée des équations, on choisit ici le torseur dont la somme des composantes est égale à 1. On définit alors la classe d'équivalence en se référant au représentant de la classe.

torseur géométrique $\vec{T}(\vec{N}_6, \vec{V}_6(S))$

On pose alors comme hypothèse fondamentale que la qualité du repérage assuré par la normale $\vec{N}_6$ est représentée par le moment du torseur géométrique et des coordonnées plückériennes de $\vec{N}_6$.

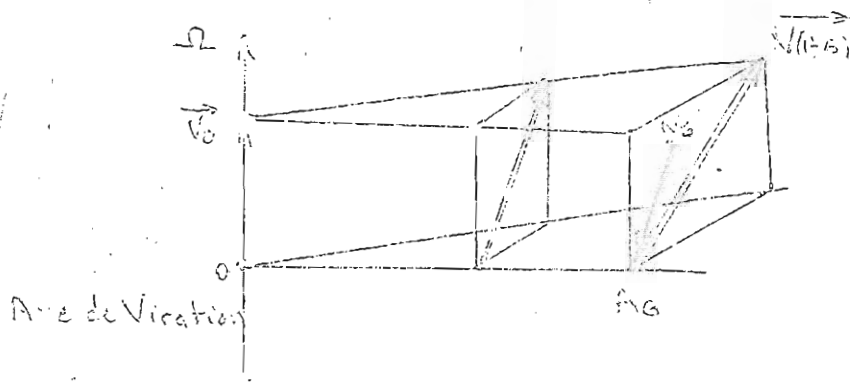
$$Q_6 = \vec{N}_6 \cdot \vec{M}_6(N_6) + \vec{N}_6 \cdot \vec{V}_6(S)$$

La qualité du repérage sera d'autant meilleure que Q_6 sera grand . .

On peut en effet montrer les deux conséquences suivantes :

- a) Le point A_6 est d'autant plus loin de l'axe de vibration que Q_6 est grand.
- b) La normale $\vec{N}_6$ s'oppose d'autant plus frontalement au mouvement que Q_6 est grand. A la limite $\vec{V}(A_6)$ est colinéaire à $\vec{N}_6$ et de sens contraire.

Ceci correspond exactement à la règle de Maxwell.



En opérant de même pour toutes les normales on peut alors définir une séquence de 6 coefficients de qualité Q_i pour $i = 1, 2, \dots, 6$. Cette séquence définit alors complètement les propriétés du montage considéré.

Ces coefficients se calculent aisément en fonction des coordonnées des points A_i et des composantes des vecteurs $\vec{N}_i$. Si l'on pose :

$$A_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \quad \vec{N}_i = \begin{pmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{pmatrix}$$

$$Q_i = \vec{N}_i \cdot \vec{M}_i(N_i) + \vec{N}_i \cdot \vec{V}_i(S)$$

$$Q_6 = \frac{\begin{vmatrix} L_1 & M_1 & N_1 & a_1 & b_1 & c_1 \\ L_2 & M_2 & N_2 & a_2 & b_2 & c_2 \\ L_3 & M_3 & N_3 & a_3 & b_3 & c_3 \\ L_4 & M_4 & N_4 & a_4 & b_4 & c_4 \\ L_5 & M_5 & N_5 & a_5 & b_5 & c_5 \\ L_6 & M_6 & N_6 & a_6 & b_6 & c_6 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} L_1 & M_1 & N_1 & a_1 & b_1 & c_1 \\ L_2 & M_2 & N_2 & a_2 & b_2 & c_2 \\ L_3 & M_3 & N_3 & a_3 & b_3 & c_3 \\ L_4 & M_4 & N_4 & a_4 & b_4 & c_4 \\ L_5 & M_5 & N_5 & a_5 & b_5 & c_5 \\ 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}} = \frac{\Delta}{\Delta_6}$$

Les autres coefficients Q_i s'obtiennent de la même manière en remplaçant à chaque fois la i ème ligne du tableau des coordonnées plückériennes par une ligne de 1. Ceci explique le choix du représentant de la classe du torseur géométrique considéré.

On obtient ainsi un moyen très simple d'opter entre plusieurs solutions solutions, en utilisant simplement un mini ordinateur de table. Rappelons qu'un coefficient Q_1 faible correspond à une force de contact élevée et à une mauvaise mise en position. Inversement lorsque Q_1 est grand la force de contact est faible et la mise en position est bonne.

OPTIMALISATION D'UN MONTAGE D'USINAGE.

A présent que nous disposons d'un critère d'optimalité, il faut établir un algorithme d'optimisation. Le problème est très complexe car il s'agit de faire croître simultanément 6 fonctions non linéaires. L'algorithme que nous proposons est entièrement original, mais nous tenons à préciser que contrairement à ce qui précède il n'est pas encore opérationnel. Nous travaillons à sa mise au point en collaboration avec H. Gallet déjà cité et le service de recherche opérationnelle du Laboratoire Central de l'Armement.

Il s'agit de rendre les Q_i aussi grands que possible sur une pièce donnée. Or dire que la solution est optimale revient à dire que les Q_i sont les plus grands possibles. (Optimalité au sens de Pareto)

Nota: Selon le problème posé, on pourra souvent se limiter à l'optimisation de quelques Q_i seulement.

Chaque Q_i est une fonction de 12 variables indépendantes que l'on peut représenter dans R^{12} comme une surface équipotentielle de potentiel Q_i . $Q_i = F_i(x_1, x_2, \dots, x_{12})$

Chacune de ces 6 équipotentielles passent par le point Π de R^{12} représentant la position initiale choisie. On sait que le vecteur gradient en un point d'une surface équipotentielle est orienté dans le sens des équipotentielles croissantes.

Par conséquent si l'on considère l'une des fonctions F_i , on aura une augmentation du potentiel Q_i , si l'on passe du point initial K au point final voisin K' par le chemin KK' tel que:

$$\vec{K} = \vec{K'} + \lambda \text{grad } F_i \quad \lambda \geq 0$$

Un tel déplacement entraînera une augmentation simultanée des autres Q_j si et seulement si :

$$\text{grad } F_i \cdot \text{grad } F_j \geq 0 \quad \forall i \text{ et } j$$

Ce qui revient à dire que dans R^{12} tous les vecteurs gradients doivent être compris à l'intérieur d'un cône d'angle au sommet $\frac{\pi}{2}$.

Dans le cas contraire l'optimum est atteint.

Le chemin le plus court pour passer d'une équipotentielle à une autre est le long du gradient $\vec{KK'} = \lambda \text{grad } F_i$, dans lequel λ est arbitraire positif, tant que l'on reste à l'intérieur du domaine de variation des point A_i . Mais évidemment ce n'est pas le chemin le plus court pour les autres équipotentielles. Le déplacement $\vec{KK'}$ le plus général que l'on peut donner est de la forme:

$$\vec{KK'} = \lambda_1 \text{grad } F_1 + \lambda_2 \text{grad } F_2 + \lambda_3 \text{grad } F_3 + \dots + \lambda_6 \text{grad } F_6$$

On dispose donc de 6 constantes arbitraires pour donner un déplacement dans le cas de l'optimisation compatible avec les propriétés des différents domaines de variations. Si l'on considère par exemple F_1 et F_2 , les distances du point A_1 à ses frontières dans la direction KK' , on voit que les λ_i doivent être les fonctions d'indépendantes:

$$\begin{cases}
 \lambda_1 \text{grad} f_1(\vec{x}) + \dots + \lambda_6 \text{grad} f_6(\vec{x}) \leq \vec{0} \\
 \lambda_1 \text{grad} f_1(\vec{y}) + \dots + \lambda_6 \text{grad} f_6(\vec{y}) \leq \vec{0} \\
 \vdots \\
 \lambda_1 \text{grad} f_1(\vec{y}) + \dots + \lambda_6 \text{grad} f_6(\vec{y}) \leq \vec{0}
 \end{cases}$$

$$\lambda_1 \geq 0, \lambda_2 \geq 0, \lambda_3 \geq 0 \\
 \lambda_4 \geq 0, \lambda_5 \geq 0, \lambda_6 \geq 0$$

On procède ainsi par itérations successives, en recalculant à chaque pas les nouvelles valeurs des Q_i . Le problème est considéré comme ayant une solution optimale lorsqu'il n'est plus possible de trouver des λ_i satisfaisant le système d'inéquations (toutes les frontières sont atteintes) ou lorsque les 6 vecteurs gradients ne sont plus à l'intérieur du cône d'angle au sommet $\frac{\pi}{2}$. (diminution d'un des Q_i)