

PARTIE I

Généralités

Robots sériels et parallèles



RÉSUMÉ

Ce chapitre présente les concepts de base, les définitions et la classification des robots sériels et parallèles. Les outils de calcul de mobilité y sont détaillés pour les robots parallèles.

M. Bouri, R. Clavel

Sommaire:

1.1	Définition, historique, domaines d'application, poids économique, caractéristiques.	2
1.1.1	Définitions et historique.	2
1.1.2	Domaines d'application, poids économique.	3
1.1.3	Caractéristiques à préciser dans le cahier des charges.	5
1.2	Robots sériels : géométries et applications.	8
1.2.1	Introduction.	8
1.2.2	Géométries.	8
1.2.3	Applications.	12
1.3	Robots parallèles et hybrides: mobilités, types, applications	14
1.3.1	Caractéristiques	14
1.3.2	Définition	16
1.3.3	Mobilité d'une structure cinématique	16
1.3.4	Les robots parallèles recensés.	17
1.3.5	Description du concept DELTA et définition de ses constituants.	24
1.3.6	Mobilité du robot DELTA à 6 barres parallèles.	25
1.3.7	Singularités du robot DELTA	26
1.4	Etude plus complète de la structure parallèle du robot DELTA.	28
1.4.1	Modèles géométriques.	37
1.5	Bibliographie	41

1.1 Définition, historique, domaines d'application, poids économique, caractéristiques.

1.1.1 Définitions et historique.

Si le concept d'automate date de plusieurs siècles, le mot robot n'est apparu que très récemment. Il est dérivé du mot tchèque *robot* signifiant travail ou même corvée. Il a été introduit en 1920 par l'écrivain tchèque Karel Capek dans sa pièce d'anticipation "R.U.R." ("Les Robots Universels de Rossum") pour désigner des machines automatiques appelées à remplacer les hommes dans les tâches les plus pénibles.

Aujourd'hui, le mot robot est employé aussi bien pour désigner le plus simple des manipulateurs, et même des appareils ménagers, que la machine la plus sophistiquée. C'est pour cette raison que l'on a introduit la notion de robot industriel.

Le secteur d'activité des *systèmes robotiques* s'est élargi de façon importante; des applications dans les domaines médical, spatial, formation, agriculture, génie civil, voire militaire (liste non exhaustive) ont conduit à élargir de façon importante cette notion de système robotique. Sur le plan quantitatif, il est indéniable qu'actuellement les robots industriels jouent le rôle le plus important. La plupart des concepts et méthodes de la robotique industrielle sont transposables dans les autres secteurs. Les robots autonomes sont maintenant en phase de croissance marquée, en particulier dans les domaines domestiques (tondeuse à gazon, aspirateur), sécurité, espace, entretien (par exemple exploration de conduites).

Par *robot industriel* (RI) on entend une machine automatique reprogrammable et polyvalente, conçue pour déplacer des matériaux, des pièces, des outils, ou des dispositifs spécialisés au travers de déplacements variables et programmables pour accomplir diverses tâches. Cette définition s'apparente à la norme proposée par l'AFNOR (Norme enregistrée NF E 61400 en août 1983 et acceptée entre temps au niveau international ISO. Il est clair que cette définition reste encore trop vague pour permettre de classer systématiquement une machine comme étant, ou n'étant pas, un robot industriel.

Il n'en reste pas moins que les manipulateurs pneumatiques, couramment appelés *bras de charge*, bien connus, n'ont pas à être considérés comme des robots industriels car ils ne sont pas librement programmables et ne peuvent de ce fait pas exécuter un nombre variable d'opérations différentes lors d'une application. De même, il faut exclure de la famille des robots industriels les systèmes de fabrication et de montage automatiques, conçus pour une application particulière (automation rigide).

Les premiers robots industriels sont apparus sur le marché aux Etats Unis en 1962. Utilisés tout d'abord uniquement dans l'industrie automobile, ils ont peu à peu conquis d'autres secteurs de l'économie tels que la métallurgie, la microtechnique, l'agroalimentaire, la chimie-pharmacie, voire le bâtiment.

Discrédités dans les années 80 par les excès technologiques et une fréquente inadéquation aux besoins, les robots industriels reviennent en force. Devenus moins chers et plus efficaces, ils offrent des solutions rentables aux entreprises à la recherche de compétitivité. En 2008,

on peut estimer que le nombre de robots industriels installés dans le monde a largement dépassé 1 million. Environ 350'000 RI sont installés au Japon. Les deux dernières années, on a pu observer une croissance annuelle de près de 20% suivant les régions. La densité de robots pour 10'000 ouvriers varie entre 50 et 150 pour les pays industrialisés (Europe et USA) alors qu'elle atteint 330 au Japon et environ 150 en Corée.

1.1.2 Domaines d'application, poids économique.

Les domaines d'application sont très variables et ils évoluent avec les années. On peut citer:

domaines bien établis	<p><u>industrie automobile</u>: soudure par points, à l'arc, pose de roues, de vitres, de joints de colle, etc.</p> <p><u>industries mécaniques</u>: soudage, manipulations, polissage, ébavurage, alimentation de presses (injection, découpage, emboutissage), découpage par laser, par jet d'eau, usinage par enlèvement de copeaux, etc.</p> <p><u>industrie des appareils électriques</u>: assemblage, câblage, collage, tests, etc.</p> <p><u>industrie électronique</u>: assemblage, montage de composants (CMS), tests, ...</p> <p><u>industrie alimentaire et de produits de consommation</u>: conditionnement de chocolats, biscuits, découpe de produits congelés, manutention de stockage et de déstockage, regroupement de produits en cartons ou palettes, etc.</p> <p><u>agriculture</u> : traitement des fromages, traite des vaches ;</p> <p><u>habillement, chaussure</u>: découpe de tissus, de cuir, de plastique par laser ou jet d'eau, dépôt de cordons de colle, contrôle, emballage, etc.</p>
en phase de développement	<p>laboratoire chimique et microbiologique</p> <p>industrie textile, teintures</p> <p>micromanipulation (résolution < 0,5 micron) ; en phase de progression actuellement ;</p> <p>vente par correspondance, tri de paquets</p>

**en phase de recherche
et d'essais**

agriculture: tonte des moutons, tri de fruits et légumes, cueillette de fruits, ...

construction en atelier ou sur le chantier: aplanissement des chapes, soudure, peinture, etc

gestion des déchets: tri et ramassage d'ordures

services: aide aux handicapés et aux malades, distribution de courrier, de nourriture, de médicaments, nettoyage, tankage de véhicules, surveillance, déminage médecine, chirurgie (sera bientôt en phase de développement)

espace: télémanipulation assistée

en phase d'étude

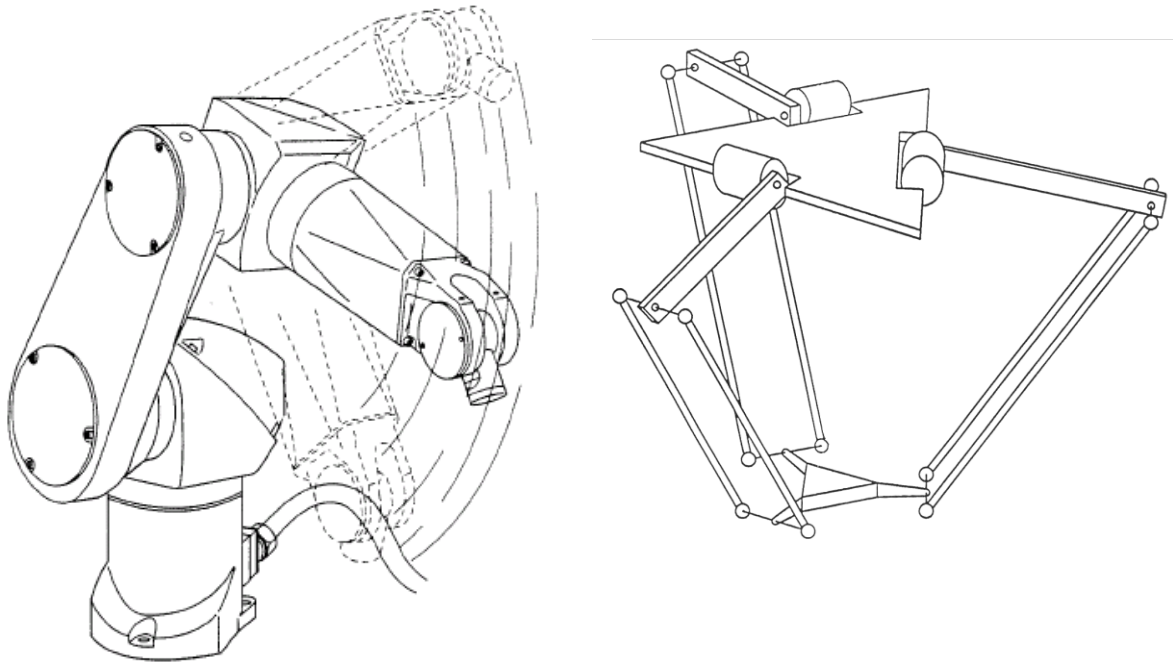
robot personnel (par analogie au PC)

robot de ménage (nettoyage, mise en ordre, cuisine, ...)

espace ; pour ce domaine, les applications sont tellement particulières que le passage en phase de développement sera toujours limité

La recherche d'une production de plus en plus flexible a poussé le développement des robots. Les postes de travail dangereux, malsains ou monotones ont conduit rapidement à l'implantation de robots en industrie dès le début de la robotique; quelques exemples d'applications: le soudage par points, à l'arc, la peinture au pistolet, la forge, la fonderie, la palettisation de charges relativement élevées (blocs de métal, paquets de journaux, cartons de briques de lait, etc). En microtechnique, certaines tâches très fines et précises ont été robotisées assez tôt, car il est très pénible pour un opérateur ou plus fréquemment pour une opératrice de se concentrer sur des opérations nécessitant l'usage du microscope ou du binoculaire. La *microrobotique* (voir 5.1) qui concerne les robots de haute précision s'occupe de ce type d'application; par exemple: bonding de chips, montage de quartz, assemblage d'optique intégrée ou de fibres optiques, assemblage de microréducteurs et de micro-moteurs.

Une part prépondérante des robots proposés sont de type sériel (voir 1.2 et fig.1 a) par des grandes entreprises (ABB, Fanuc, Kuka, Reiss, Stäubli, Yaskawa, Adept, ...) et quelques PME (par exemple Sysmelec) , c'est-à-dire comportant une seule chaîne cinématique entre la base fixe et l'outil mobile. Actuellement, une vingtaine de sociétés (certaines très petites et d'autres déjà bien établies comme ABB) proposent des robots parallèles comportant plusieurs chaînes cinématiques entre la base et l'outil mobile (voir 1.3 et fig.1 b). Un fabricant peut produire quelques dizaines de robots d'un modèle par année, parfois moins d'une dizaine, alors que d'autres produisent un même modèle à plus de 1000 exemplaires par année.



a) Robot sériel polyarticulé (Stäubli RX)

b) Schéma de la cinématique du robot parallèle DELTA à 3 degrés de liberté

Fig.1 Exemple de robot sériel a) et de robot parallèle b)

Dans les domaines bien établis, les applications dans l'industrie électrique et électronique représentent près de 40 % des robots alors que 27% se comptent dans les industries automobiles, motocyclettes, vélo (Shimano par exemple). Pour des raisons d'hygiène, de coût, de travail à température basse, de grandes variations de demande en cours d'année, l'industrie alimentaire s'équipe de plus en plus d'installations robotisées.

Les robots utilisés sont de type SCARA (voir 1.2.2) pour près de la moitié; le reste est presque totalement couvert par les robots polyarticulés et les robots cartésiens; quelques robots à coordonnées cylindriques et sphériques ainsi que quelques géométries particulières (dont les robots parallèles) occupent un petit 10%.

1.1.3 Caractéristiques à préciser dans le cahier des charges.

Bien que la principale caractéristique d'un robot industriel soit la flexibilité, il reste nécessaire de définir un cahier des charges qui précisera certains paramètres propres à permettre une comparaison des produits offerts sur le marché. Les paramètres principaux à considérer lors de l'évaluation d'un robot sont définis ci dessous :

- *La mobilité* qui définit le nombre de degrés de liberté nécessaires à l'application considérée; dans certains cas, on choisit un robot avec une mobilité supérieure au

- *La précision* sera généralement donnée globalement en bout de bras. En fait, ce qui intéresse l'utilisateur dans la plupart des applications, c'est la *répétitivité* (précision relative) plutôt que la précision absolue. Lorsqu'une bonne précision absolue est recherchée, il est nécessaire de procéder à un calibrage du robot selon une démarche du même type que celle effectuée dans le domaine des machines de mesure.
- *Le milieu* dans lequel le robot doit opérer est d'une importance primordiale. Il est essentiel de préciser certaines conditions particulières d'utilisation comme la présence de poussière abrasive, d'humidité, de vibrations, etc.; si le robot peut être perturbé par le milieu dans lequel il travaille, il ne faut pas oublier que l'inverse peut se produire et que le robot peut polluer un espace de travail destiné à des opérations nécessitant une grande propreté. D'autre part, la nature du produit manipulé peut exclure certains choix technologiques (emploi de moteurs à balais dans un milieu explosif).

Un robot industriel est amené à saisir et déplacer des objets (pièces ou outils). Il suppose donc une structure mécanique. La maîtrise d'un objet dans l'espace cartésien implique sa localisation et son orientation. Pour positionner un point de l'objet dans l'espace, il faut disposer de 3 degrés de liberté. Le point correspondant à l'objet étant fixé, si l'on désire orienter l'objet de manière quelconque, il faut disposer en plus de trois nouveaux degrés de liberté.

Pour les robots de type sériel et pour quelques hybrides, les trois premiers degrés de liberté définissent ce que l'on appelle le *porteur*, alors que les trois suivants constituent le *poignet*. Il faut donc au moins 6 axes pour qu'un robot industriel puisse être dit complet. Signalons que si le bras humain en compte 7 (3 au niveau de l'épaule, 2 au niveau du coude et 2 au niveau du poignet), il s'agit d'une redondance dans la mesure où le coude nous permet de contourner les obstacles.

1.2 Robots sériels : géométries et applications

1.2.1 Introduction.

Sans entrer dans trop de détails, on peut classer les robots fixes selon 2 groupes principaux :

- les robots **sériels**, caractérisés par le fait qu'une seule chaîne cinématique relie la base fixe à l'organe terminal mobile (1.1 / fig.1 a);
- les robots **parallèles** caractérisés par le fait que plus d'une chaîne cinématique assure la liaison entre la base fixe et l'organe terminal mobile; on parle également de cinématique bouclée (1.1 / fig.1 b). Certains robots peuvent être une combinaison de cinématiques sérielles et parallèles; on parle dans ce cas de robots hybrides (fig.1 ci-contre). Vu les caractéristiques de ces cinématiques, nous classerons pour simplifier les robots hybrides avec les robots parallèles qui sont étudiés dans la section 1.3.

A part le robot Pollard (voir 1.3), la plupart des robots conçus avant les années 80 étaient de type sériel; les raisons principales sont les suivantes:

- similitude avec le bras humain, les ponts roulants ou certaines machines de chantier,
- facilité de calcul des transformations de coordonnées qui permettent de déterminer la position des axes du robot selon la position dans l'espace de travail ou l'inverse.

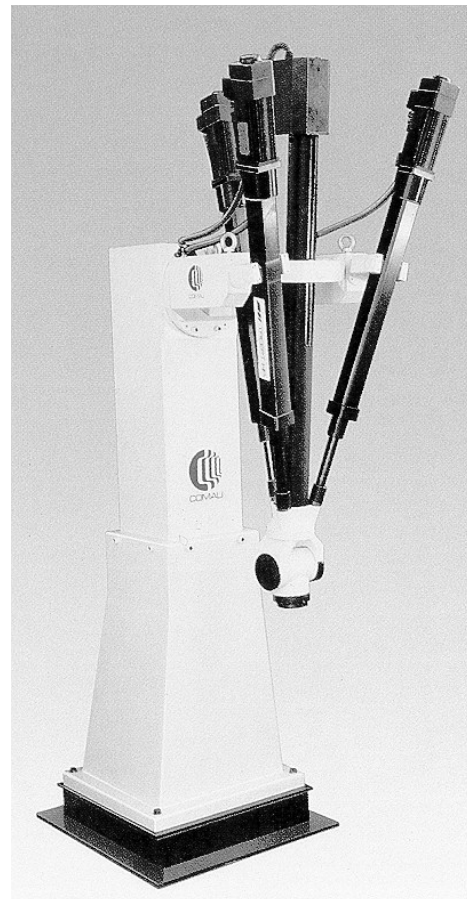


Fig.1 Le robot hybride Tricept industrialisé par les entreprises NEOS, COMAU et Siemens.

1.2.2 Géométries.

Rappelons que pour les robots sériels, les trois premiers degrés de liberté définissent ce que l'on appelle le *porteur*, alors que les trois suivants constituent le *poignet*.

En ce qui concerne le porteur, les axes (appelés axes principaux) peuvent être en translation ou en rotation. Si l'on ne prend pas en compte l'ordre, on dénombre 4 configurations principales : TTT, RTT, RRT, RRR.

La configuration TTT (3 translations) est bien adaptée à notre représentation cartésienne de l'espace (fig.2), elle correspond au monde du concepteur. La position des axes les uns par rapport aux autres ne variant pas au cours d'un mouvement (on parle de géométrie différentielle constante dans l'espace), le calcul de trajectoires et le contrôle (pas de variation d'inertie) s'en trouvent simplifiés. Cette variante est particulièrement intéressante pour l'assemblage de précision ou pour les grandes manipulations ; sa mécanique peut être assez délicate (fig.3).

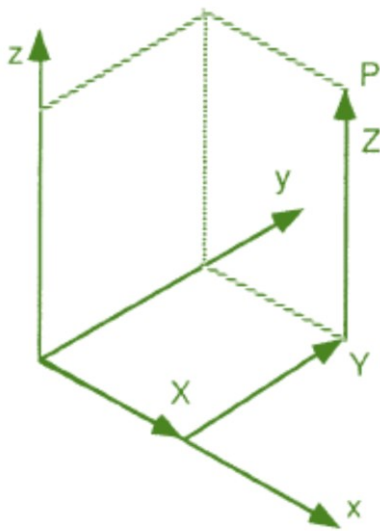


Fig.2 Système cartésien (TTT)

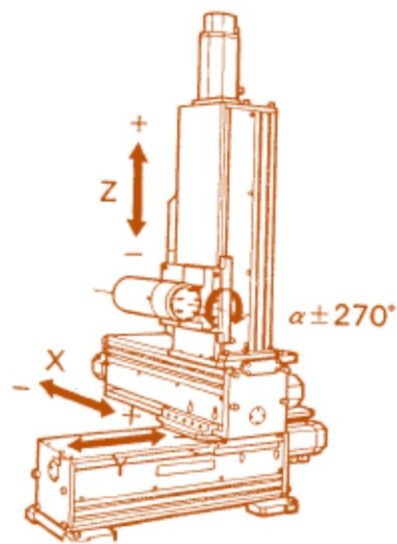


Fig.3 Robot cartésien

La configuration RTT (à coordonnées cylindriques) est la combinaison d'une rotation et de deux translations (fig.4). Elle conduit à une variante, le SCARA, qui a eu du succès en assemblage (fig.8). Les complications de construction (guidages prismatiques) et la résolution variable selon le rayon d'extension réduisent de plus en plus son utilisation; un robot SCARA le remplace avantageusement pour les applications de moyenne précision et un robot cartésien pour les hautes précisions.

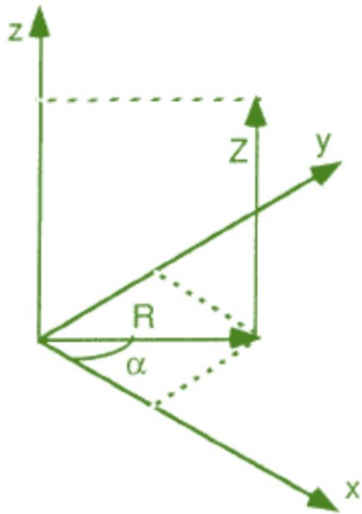


Fig.4 Système cylindrique (RTT)

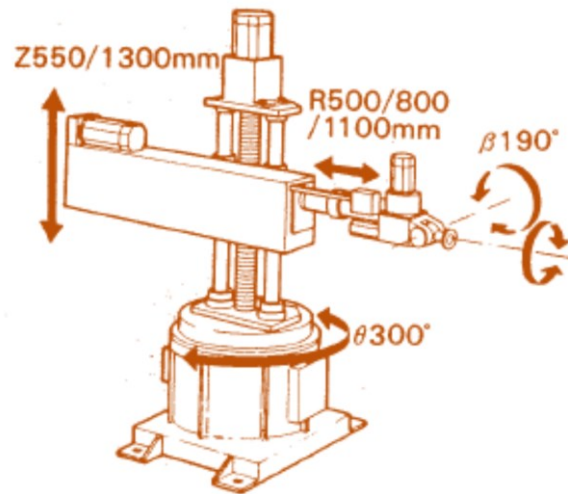


Fig.5 Robot cylindrique

Dans la configuration RRT (fig.6), on trouve une grande variété de combinaisons. La plus ancienne d'entre elles est le robot à coordonnées sphériques (fig.7).

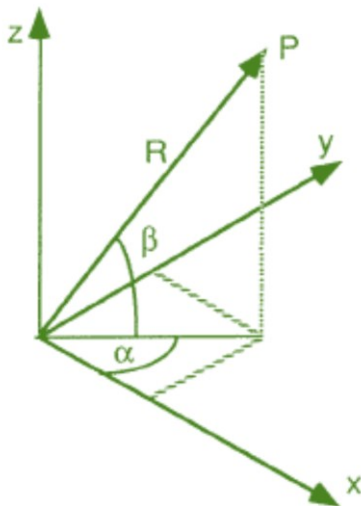


Fig.6 Système sphérique (RRT)

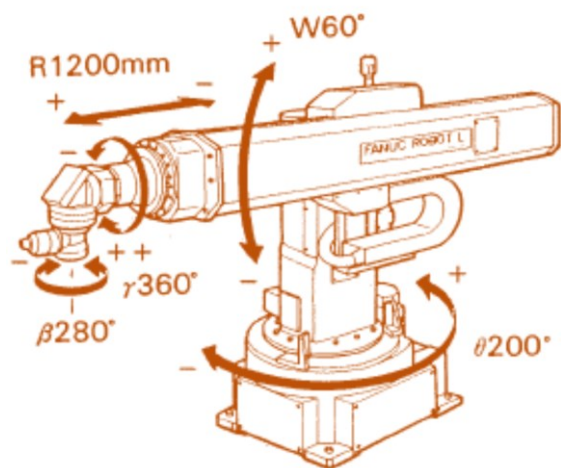


Fig.7 Robot à configuration sphérique

D'autres robots industriels disponibles sur le marché présentent la translation sur un axe vertical (fig.8 et fig.9). Cette configuration RRT, dénommée *SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm)*, a été développée au Japon dans les années 1980. Elle est la configuration la plus répandue dans le domaine de l'assemblage, alors que le type « tourelle » (fig.7) voit son utilisation fortement réduite.

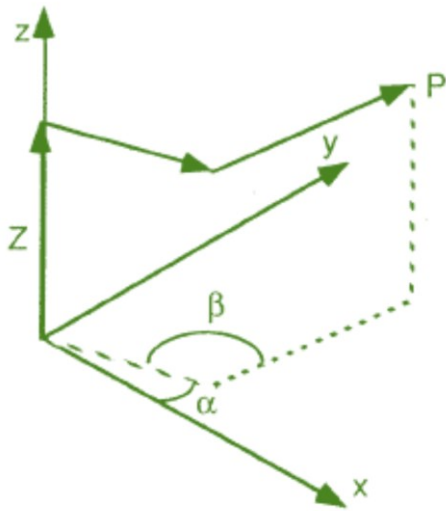
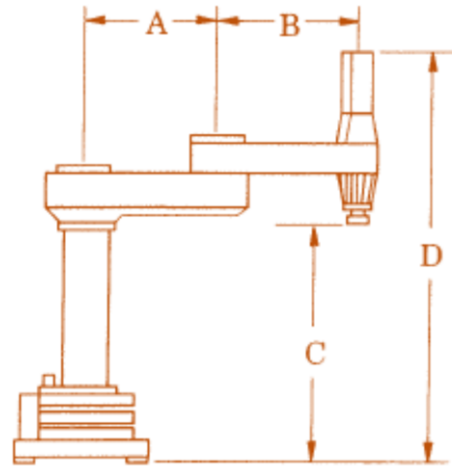


Fig.8 Configuration SCARA (RRT)



Le système RRR à coordonnées angulaires également appelé robot polyarticulé (fig.10 et 11) est certainement le plus simple du point de vue mécanique (formé uniquement par des axes rotatifs), mais il nécessite une commande sophistiquée, par exemple pour effectuer des déplacements en ligne droite. Il faut également apporter une grande attention à la conception des axes rotatifs qui doivent être très rigide pour assurer une fréquence propre élevée, nécessaire à une bonne répétitivité. Certains fabricants (Stäubli par exemple) ont fait en sorte que la totalité du câblage passe à l'intérieur du robot, au travers des articulations qui, de ce fait, deviennent plus compliquées.

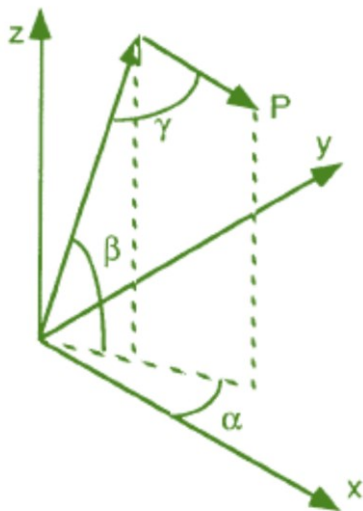


Fig.10 Configuration angulaire (RRR)

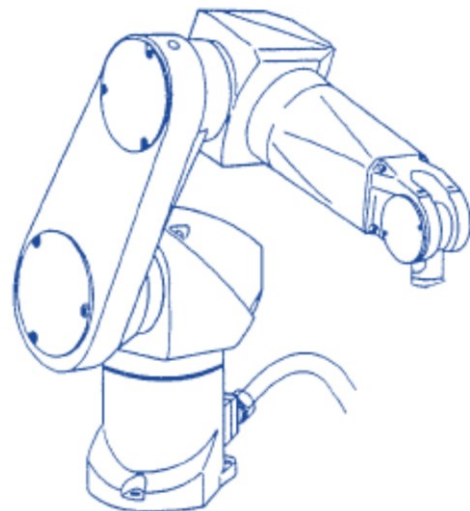


Fig. 11 Robot angulaire polyarticulé

Les trois axes du porteur ne sont pas forcément indispensables, si l'on travaille selon un plan, par exemple. Mais l'économie en axes se fait le plus souvent au niveau du poignet. En considérant certaines symétries (un corps cylindrique ne nécessite que 5 coordonnées pour

la description de sa position et une sphère n'en nécessite que 3) ou en se limitant à une famille d'opérations simples, on peut réduire le nombre d'axes du robot industriel à 5, 4 ou même 3.

1.2.3 Applications.

Au début de la robotique, un rêve était de concevoir le robot universel. L'éventail des diverses applications mentionnées sous 1.1.2 montre que ce rêve est une utopie et que cette voie conduirait inévitablement à des solutions beaucoup trop chères, compliquées et peu fiables.

Axé principalement au départ sur l'automobile (dans cette branche industrielle les opérations sont maintenant conçues dès le départ pour les robots), le plus fort pourcentage des installations récentes se rencontre aujourd'hui dans le domaine de la construction électrique et électronique (montage). Ensuite, on trouve des secteurs nouvellement gagnés comme la mécanique, le traitement des matières synthétiques et des métaux (polissage, ébavurage, etc.). Les robots industriels ont fait leur apparition dans de nouveaux domaines allant de l'agro-alimentaire à la confection en passant par la micro-manipulation; on peut affirmer sans le moindre doute qu'aucun secteur ne sera "épargné" par la robotisation.

La plus grande partie des applications mentionnées sous 1.1.2 dans les domaines bien établis sont réalisées avec des robots de type sériel. Les robots parallèles et hybrides, souvent plus compliqués à contrôler auront des débouchés dans les secteurs demandant des très grandes cadences (alimentation en particulier) ou une très grande précision et raideur (assemblage de haute précision et probablement l'usinage).

Quelques exemples d'applications de robots sériels :

- polissage et ébavurage de pièces de fonderie, de pièces de robinetterie, de poignées (porte, frein de vélo,); boîtiers et pièces de bracelet de montre, coutellerie, etc.; ces opérations sont en général effectuées par des robots angulaires à 5 ou 6 degrés de liberté;
- assemblage de microsystemes tels que accéléromètres pour air bag, micro-moteur, liaison chip – circuit imprimé ou grille, assemblage de montres, ...; ces opérations sont habituellement réalisées par des robots cartésiens à 4 degrés de liberté (x, y, z, φ_z); de façon générale, les robots cartésiens sont bien adaptés pour les travaux de précision (résolution constante dans tout le volume de travail et pas de variation d'inertie);
- assemblage de magnétoscopes, de lecteurs CD, d'appareils de téléphone, de moyeux de bicyclettes, d'imprimantes, ... effectués par des robots SCARA; pour que l'utilisation de tels robots à 4 degrés de liberté soit possible, il est indispensable de concevoir le produit à assembler en conséquence et définir une seule direction d'insertion verticale;

- soudage par points de carrosseries d'automobiles; ces applications sont pratiquement toujours effectuées par des robots angulaires à 6 degrés de liberté; parfois, pour gagner de la place dans les chaînes, les 2 premiers axes sont parallèles et horizontaux et le 3e leur est perpendiculaire; ils doivent pouvoir manipuler une charge assez élevée, vu la masse de la pince de soudage (de 50 à 150 kg); ce travail par robot permet de garantir une meilleure qualité par une plus grande régularité de l'opération; de plus, ce type d'activité est extrêmement pénible pour les opérateurs. A des échelles quelque peu différentes, ces opérations se retrouvent dans l'électroménager;
- palettisation de paquets de journaux pour l'expédition; ces applications sont en général effectuées par des robots SCARA qui ont dans ce cas la particularité d'avoir leur axe de translation positionné en première, voire en deuxième position; cette disposition permet d'obtenir des mouvements de grande amplitude verticale sans trop pénaliser l'inertie; ce genre d'opération ne requiert pas une grande précision;
- des robots RRT de type tourelle ont été utilisés dans l'automobile et également pour des manutentions dans la transformation de produits alimentaires; les premières applications (Robots Unimation) utilisaient l'énergie hydraulique ; vu qu'en général 4 degrés de liberté (x, y, z, φ_z) sont suffisants pour ces opérations de manutention, le choix de robots « tourelle » n'est pas judicieux; dans le cas particulier, c'est la charge manipulable qui a conduit au choix de ce robot hydraulique;
- un robot ABB de type RRT dit pendulaire a été présenté en 1984 pour des applications d'assemblage; sa complexité et la concurrence des SCARA ont très sérieusement limité sa diffusion.

Lorsqu'on s'occupe de systèmes robotisés, il faut être conscient que le robot en est un élément particulier et que les "accessoires" que l'on classe dans la périphérie jouent un rôle important aussi bien sur le plan des fonctions demandées que sur le plan coût (le coût total d'une installation peut varier, suivant les cas, entre 2 et 10 fois le prix du robot); il ne faut pas oublier les coûts de conception, de programmation, de mise au point, d'assemblage, de câblage, de formation et de garantie. Pour le dépannage d'installations, le télédiagnostic permettra de limiter les coûts de maintenance et de réparation alors que la réalité virtuelle et l'intelligence artificielle devraient conduire à une plus grande facilité de programmation.

Le choix du robot est lié au choix de la périphérie et réciproquement; un robot avec un axe supplémentaire pourra, dans certains cas, sérieusement simplifier la périphérie ou bien le choix d'un robot capable d'un plus grand volume de travail pourra diminuer l'importance des systèmes de transfert.

Comme pour la conception de tout système ou produit, il est indispensable d'avoir une approche globale. De plus, la concertation entre concepteurs de produits et concepteurs de systèmes d'automatisation dès le début du projet permet d'obtenir des simplifications intéressantes et des avantages substantiels au niveau coût et fiabilité.

1.3 Robots parallèles et hybrides: mobilités, types, applications

1.3.1 Caractéristiques

La plupart des robots industriels construits à ce jour sont de type sériel, c'est-à-dire que leur structure mobile est une chaîne ouverte formée d'une succession de segments reliés entre eux par des liaisons à un degré de liberté; chaque articulation est commandée par un actionneur situé à l'endroit de l'articulation ou sur un des segments précédents; dans ce dernier cas, un mécanisme assure la transmission entre l'actionneur et l'articulation considérée.

Ces robots ont pour avantage de disposer d'un grand volume de travail et d'être relativement simples sur le plan des calculs liés à leur commande. Leurs principaux défauts sont résumés ci-dessous:

- inertie élevée due aux masses réparties sur toute la chaîne cinématique (actionneurs, organes de transmission);
- manque de rigidité par la mise en série d'éléments élastiques;
- fatigue et usure des liaisons de puissance assurant l'alimentation des actionneurs (câbles, tuyaux flexibles);
- fatigue et usure des liaisons assurant la circulation des informations entre les capteurs et la commande; sur le plan sécurité, ce point est essentiel puisqu'une erreur de transmission peut avoir des conséquences désastreuses sur les mouvements du robot.

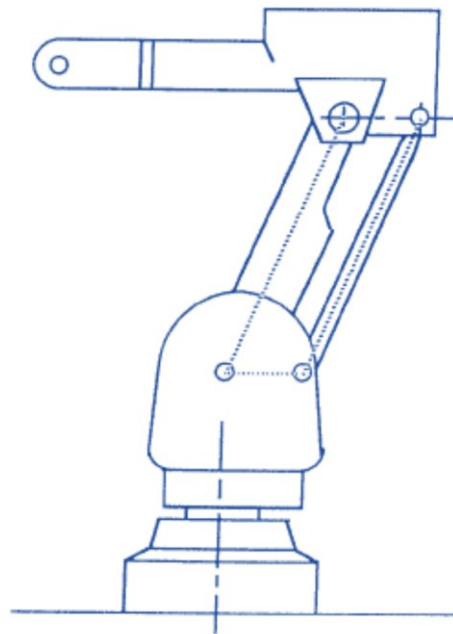


Fig.1
Exemple de robot comportant une boucle polygonale plane: ABB IRB 2'400.

Dans le but de diminuer les masses en mouvement, certains robots du marché comportent une ou plusieurs boucles fermées formant un polygone articulé plan; la figure 1 représente un cas typique. Toutes les articulations d'une boucle n'étant pas indépendantes, il est possible

de choisir dans la boucle celle que l'on veut motoriser; ceci permet de ramener les moteurs vers la base, donc de diminuer les masses en mouvement.

Certains auteurs [FICHTER 86] [DOMBRE 88] considèrent qu'un robot parallèle est caractérisé par le fait que les différents corps mobiles forment plusieurs chaînes cinématiques qui relient toutes directement la base à l'organe terminal; certains auteurs parlent dans ce cas de robots pleinement parallèles. Le robot type correspondant à cette définition est la plate-forme de STEWART [STEWART 65] dans sa variante représentée à la figure 2.

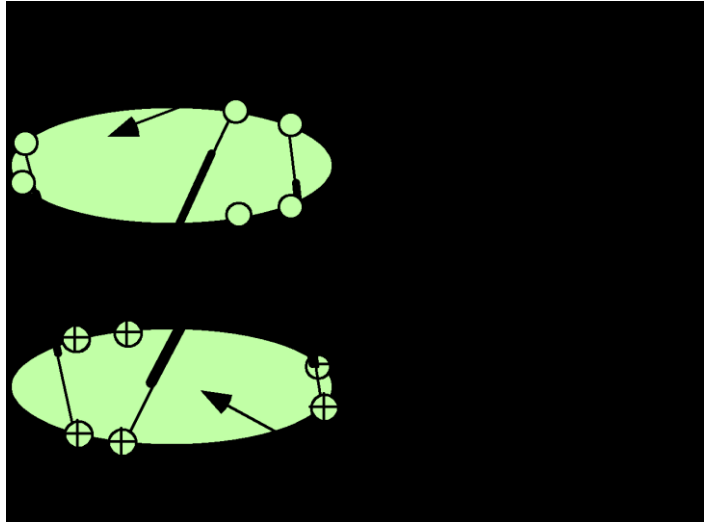
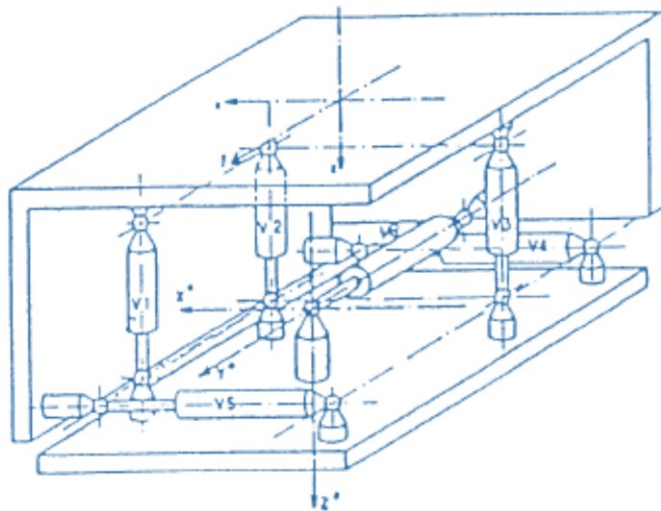


Fig.2
Plate-forme de **Gough-Stewart**

Cette plate-forme mobile à 6 degrés de liberté a été développée pour remplir la fonction de simulateur de vol; un mécanisme du même type a été utilisé précédemment pour le test de pneumatiques [GOUGH 62]; plusieurs robots expérimentaux ont été construits sur la base de ce concept; en particulier le robot "GADFLY" de GEC [DWOLATZKY 88] et le poignet "SPACE 1" (système poignet à contrôle d'effort) [REBOULET 88]. Artigue propose une structure mobile sur un principe identique, mais avec une disposition spatiale différente [ARTIGUE 84] (Cf.Fig.3). La mise en série de plusieurs plate-formes de STEWART permet de créer un robot redondant en forme de trompe [KWASNY 87].

Fig.3
Manipulateur parallèle à 6 degrés de liberté utilisé comme poignet actif pour le montage d'un triangle de suspension; course de chaque actionneur hydraulique: ± 5 mm.



1.3.2 Définition

Nous appellerons **robot parallèle** un robot comportant au moins 2 corps reliés par plus d'une chaîne cinématique en excluant les robots qui diffèrent des robots à structure série uniquement par le fait qu'ils comportent une ou plusieurs boucles formant chacune un polygone plan.

Une chaîne cinématique est un ensemble de segments disposés en alternance avec des liaisons.

1.3.3 Mobilité d'une structure cinématique

Définitions

Degré de liberté (DL):

le nombre de degrés de liberté d'un système est le nombre de variables indépendantes nécessaires à la description totale de la structure cinématique.

Structure cinématique mobile:

une structure cinématique est dite mobile lorsque le nombre de DL est supérieur ou égal à 1; soit MO la mobilité de la structure considérée; MO est égal au nombre de DL de la structure cinématique.

Mobilité d'une structure cinématique.

Considérons une structure cinématique formée de n pièces solides; le nombre de degrés de liberté de cet ensemble avant tout assemblage en vue de créer la structure cinématique considérée est évidemment $MO = 6n$.

Chaque liaison entre 2 pièces diminue la mobilité de l'ensemble d'une valeur correspondant au nombre de forces généralisées (NFG) présentes dans la liaison considérée ; avec k liaisons MO prend la valeur suivante:

$$MO = 6n - \sum_{i=1}^k NFG_i$$

Le nombre de forces généralisées (NFG_i) intervenant dans une liaison est le complément à 6 du nombre de degrés de liberté (MO_i), soit: $NFG_i = 6 - MO_i$ d'où:

$$MO = 6n - 6k + \sum_{i=1}^k MO_i$$

$$MO = 6(n - k) + \sum_{i=1}^k MO_i \quad \text{Formule de Grübler}$$

Considérons qu'une des pièces est fixe (ses 6 DL sont bloqués) et prenons-la comme référence (bâti pour un robot); MO prend ainsi la valeur suivante:

$$MO = \sum_{i=1}^k MO_i - 6b_0$$

Créer une boucle dans une structure donnée consiste à ajouter une liaison sans ajouter de pièce.

Ajouter une pièce conduit obligatoirement à ajouter une liaison supplémentaire.

Ces 2 constatations conduisent à la relation suivante pour un système de n pièces, k liaisons et bo boucles:

$$n = k - bo + 1$$

Avec cette expression, la mobilité MO prend la forme suivante:

$$MO = \sum_{i=1}^k MO_i - 6bo$$

La mobilité d'une structure cinématique dont un des éléments est fixé sur une base fixe est donc égale à la somme des mobilités de toutes les liaisons moins 6 fois le nombre de boucles.

Cette expression peut être utilisée pour rechercher systématiquement de nouvelles géométries de robots; elle est également très intéressante pour déterminer la mobilité d'un système cinématique donné; les hyperguidages ou les trop grandes mobilités peuvent facilement être mis en évidence par cette formulation.

1.3.4 Les robots parallèles recensés.

Les brevets et la littérature nous ont permis de recenser un certain nombre de structures cinématiques qui ont conduit ou qui peuvent conduire à des concepts de robots parallèles conformes à la définition donnée précédemment. Nous les avons réunies en 4 groupes.

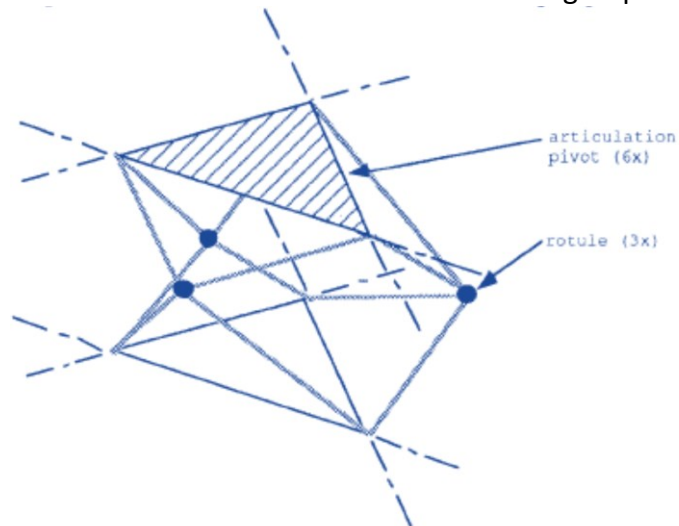


Fig.4
Principe du mécanisme polyarticulé inventé par Lambert [LAMBERT 83].

Le **premier groupe** concerne des modules de robots comportant 3 degrés de liberté; ces modules [LAMBERT 83] (Cf.Fig.4) [KRUEGER 85] [KIMURA 83] seront souvent mis en série les uns avec les autres pour former des robots en forme de trompe. Le principe de base est identique pour ces 3 inventions; il s'agit d'un module comportant 2 plaques reliées par 3 (dans certains cas 4) chaînes cinématiques munies chacune d'un actionneur; la combinaison du mouvement des actionneurs assure le déplacement d'une plaque par rapport à l'autre selon

une translation et 2 rotations. Selon un principe proche, Lande et David [LANDE 78] ont proposé une articulation permettant 3 rotations; ce mécanisme peut être utilisé comme poignet de robot.

Le **deuxième groupe** concerne des robots à 5 ou 6 degrés de liberté comportant un porteur formé de 2 ou 3 chaînes cinématiques parallèles [POLLARD 38] (Cf.Fig.5) [SHUM 81] [ASEA 85] (Cf.Fig.6) [DWOLATZKY 88]. Ces structures fonctionnent selon le même principe: 3 bras concourent vers un même point; le mouvement de ces bras provoque le déplacement de ce point; l'orientation de la pièce porteuse du poignet est assurée soit par un des bras (Pollard, Asea, Shum), soit par un support passant par un point fixe (Dwolatzki).

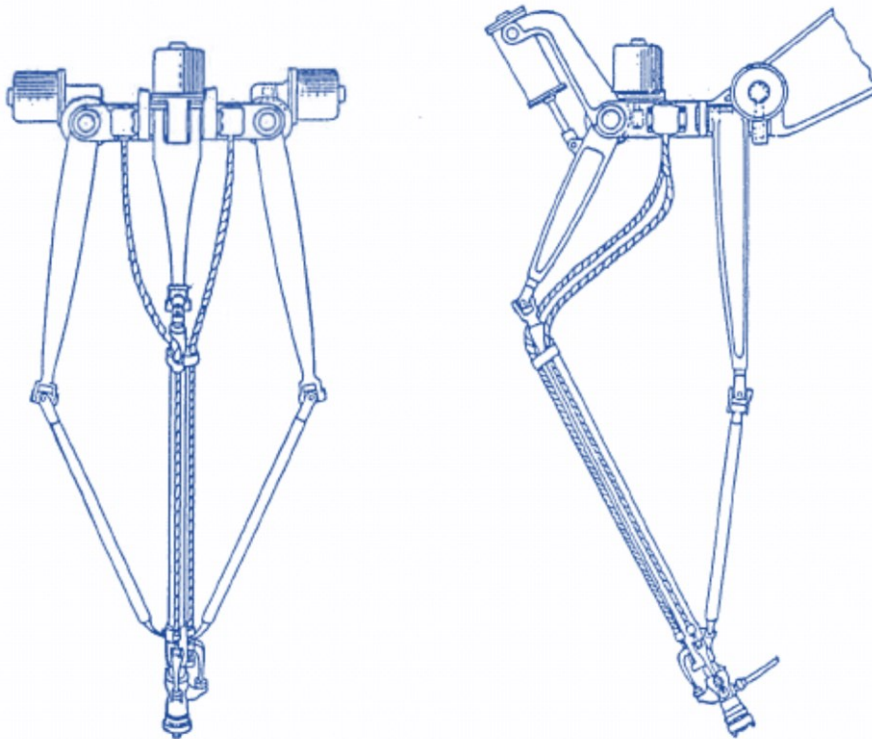


Fig.5 Le robot "POLLARD" prévu pour effectuer la peinture de voitures [POLLARD 38]; en 1938, les moyens électroniques et informatiques ne permettaient pas de commander un tel robot.

On peut également inclure dans ce groupe le robot miniature nommé "Colibri" [BURCKHARDT 88] [LIU 90] développé à l'Institut de microtechnique de l'EPFL; une variante de ce robot à 6 degrés de liberté est montrée à la figure 7.

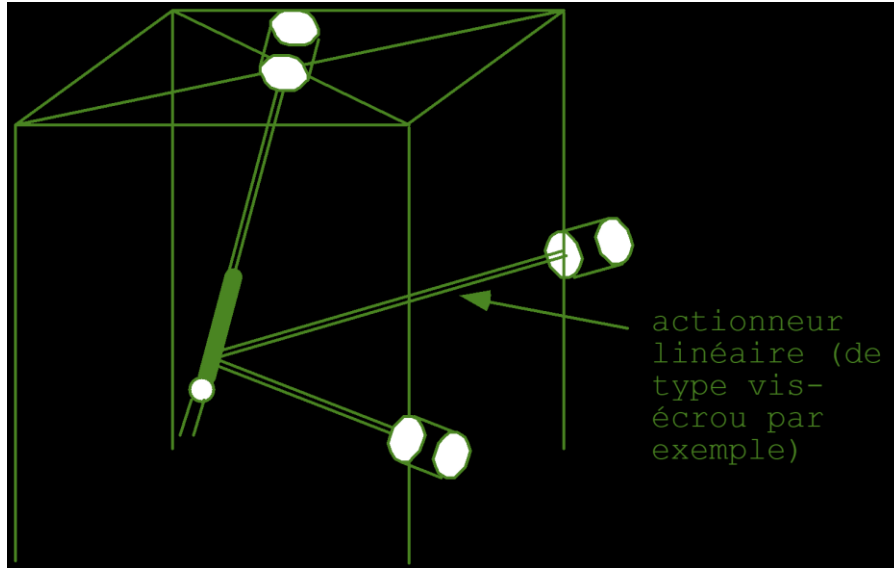


Fig.6 Etape du développement du robot pendulaire IRB 1'000 d'Asea [ASEA 85]; les actionneurs sont liés au bâti par des cardans et la jonction des 2 modules inférieurs avec le support du poignet est assurée par 2 rotules.

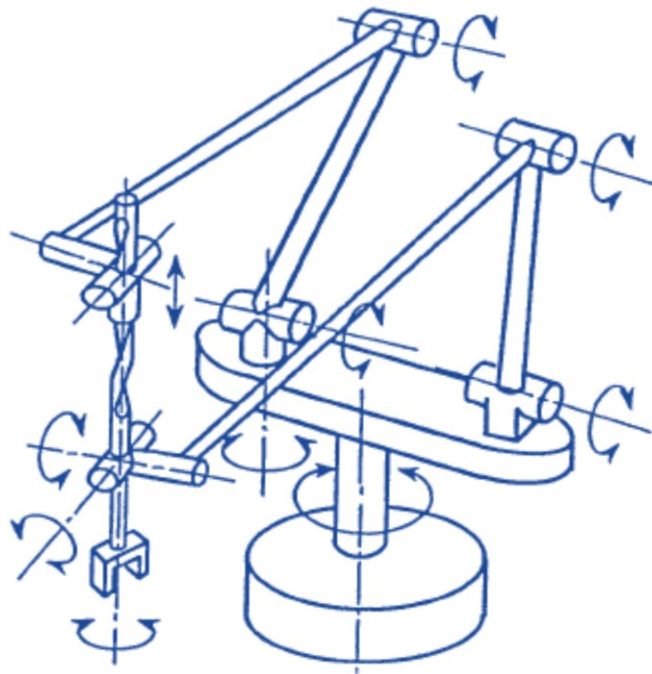


Fig.7 Robot parallèle "Colibri" à 6 degrés de liberté formé d'une plate-forme pivotante sur laquelle sont montés 2 bras articulés comportant respectivement 2 et 3 degrés de liberté; la boucle est fermée par le système à vis reliant les extrémités des 2 bras.

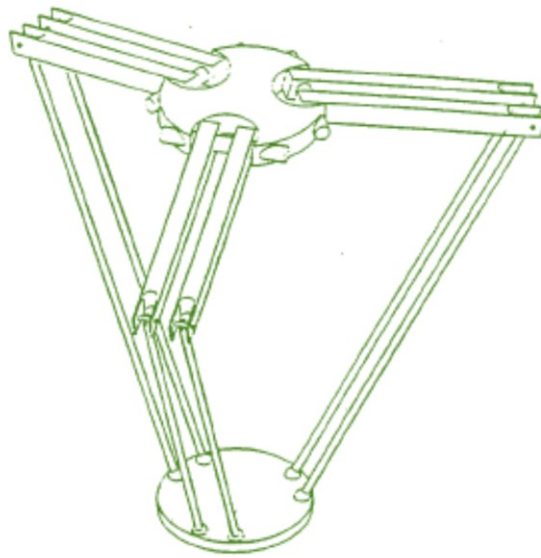


Fig.9 Robot HEXA proposé par Pierrot du LIRMM (Laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier)

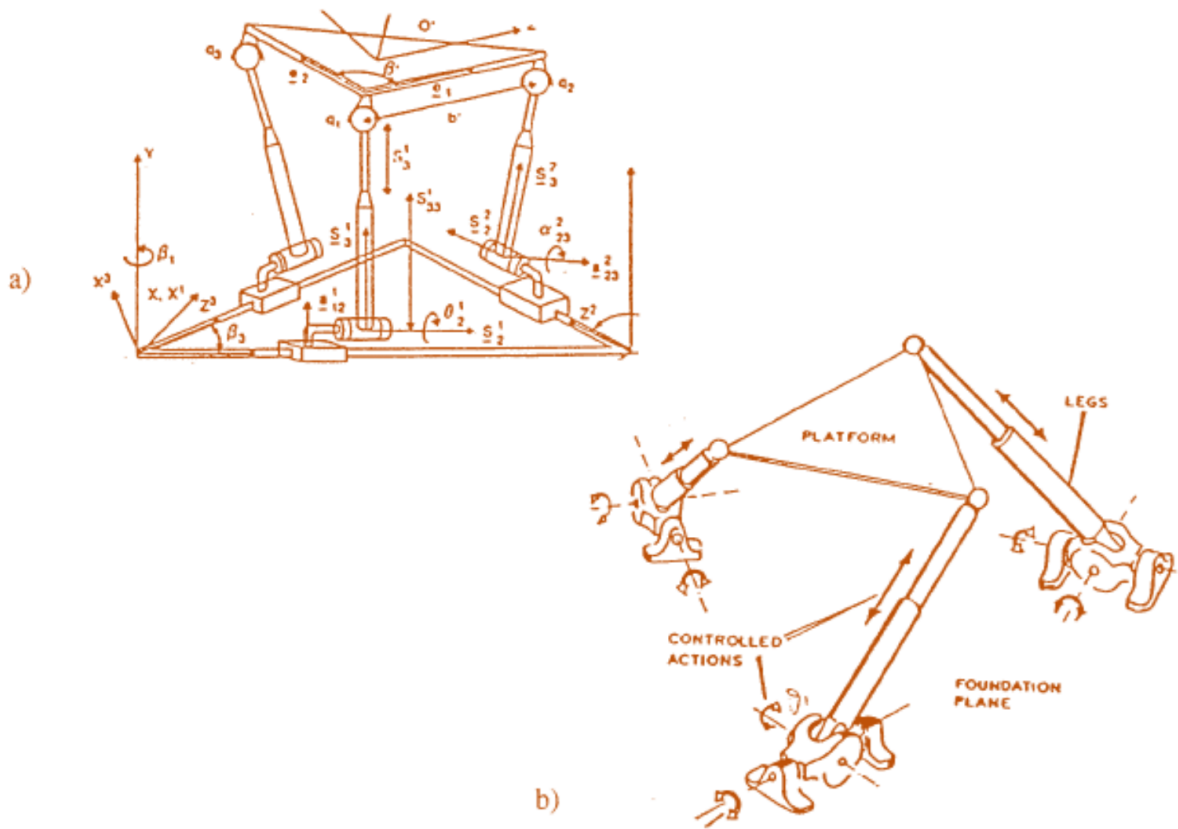


Fig. 10 a) Manipulateur de Behi [BEHI 88]
b) Simulateur de vol de Stewart [STEWART 65]

Le **quatrième groupe** englobe les structures parallèles permettant de déplacer l'élément porteur du poignet en conservant constantes ses 3 orientations.

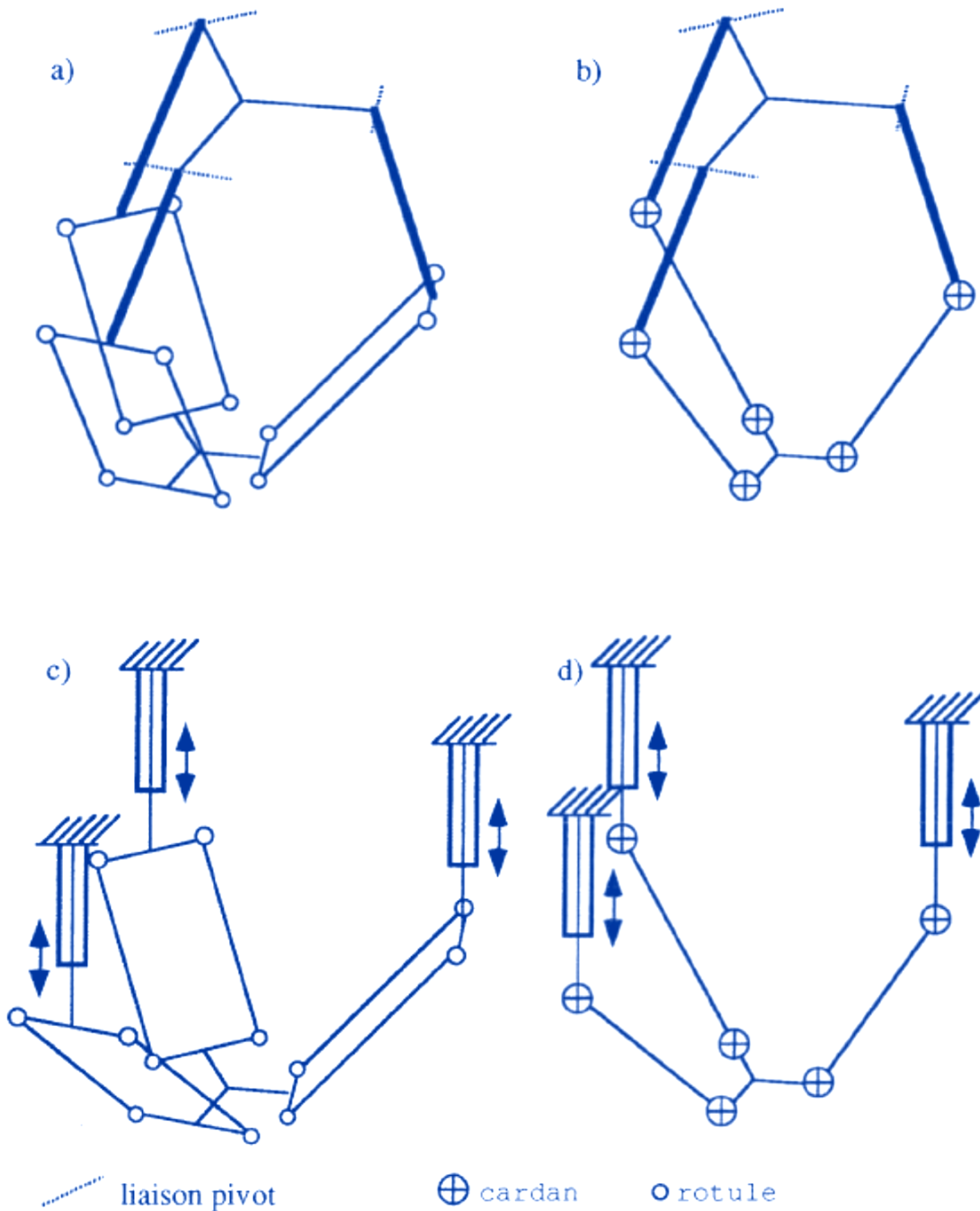
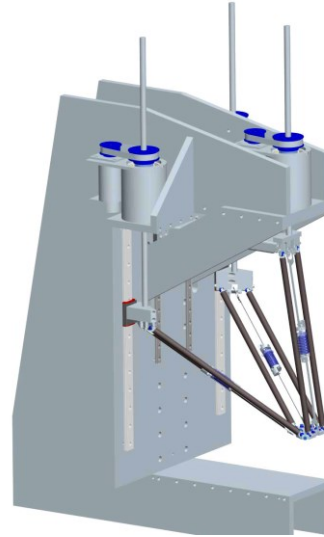


Fig.11 Les 4 structures de base du robot DELTA; les cas a) et b) comportent des actionneurs tournants (liaison pivot), les cas c) et d) des actionneurs linéaires (liaison glissière); dans les cas a) et c), les liaisons entre la nacelle et les bras sont assurées par 3 paires de barres parallèles et 12 rotules; pour les cas b) et d), ces liaisons sont assurées par 3 barres et 6 cardans; la structure a) a été retenue pour la réalisation des premiers robots.

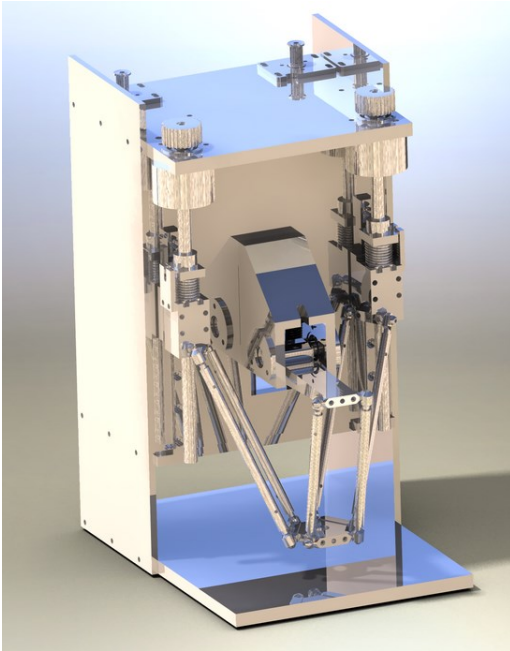
En c) et d), les guidages rectilignes peuvent être disposés différemment, par exemple sur les arrêtes d'une pyramide ; cela donne le DELTA Keeps. Une combinaison avec un bras tournant et 2 guidages rectilignes donne le robot DELTA Ibis.



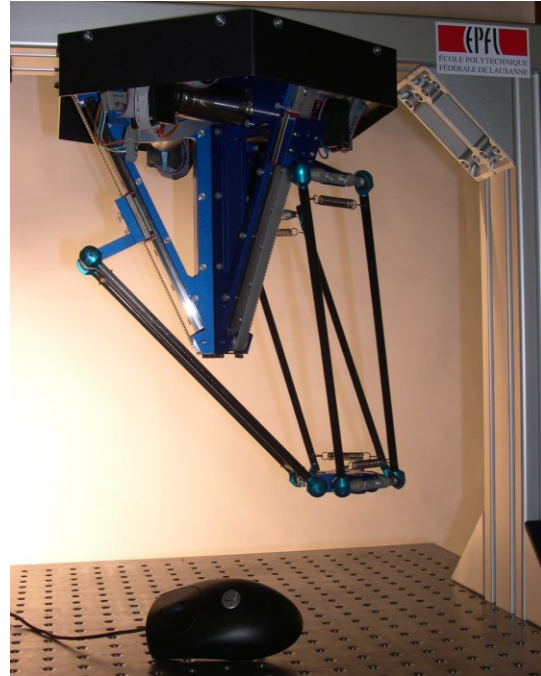
a) Delta linéaire vertical à 3 colonnes



b) Delta linéaire vertical à bâti déporté



c) Delta Ibis



d) Delta Keeps

Fig.11' Quatre versions de Delta conduisant à des caractéristiques spécifiques pour le chassage (a), pour travail de précision en interaction avec une table rotative (b), pour assemblages horlogers et / ou intégration dans une micro fabrique (c) et pour manipulations sur une surface importante (d). Dans ce dernier cas, un paramètre supplémentaire (l'angle entre le guidage rectiligne et la verticale) peut être judicieusement utilisé pour privilégier la force en vertical ou la surface de travail.

La solution présentée à la figure 12a de Flory [FLORY 67] est une sorte de parallélogramme de l'espace si les plates-formes ne peuvent pas pivoter autour d'un axe vertical; la figure 12b montre une solution originale de Simunovic [SIMUNOVIC 84].

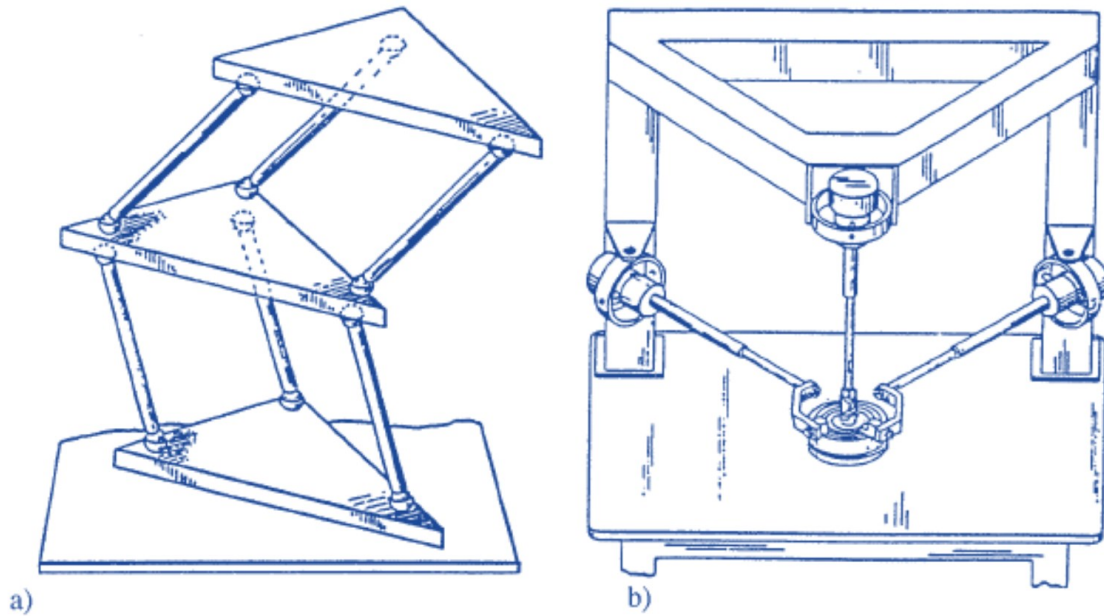


Fig.12 a) Structure **mobile Flory**; pour garantir le maintien de l'orientation des plates-formes mobiles, il est nécessaire que chaque étage comporte une barre munie d'un cardan à chaque extrémité; la position de la plate-forme centrale représente un degré de liberté supplémentaire.
b) Manipulateur **Simunovic**.

1.3.5 Description du concept DELTA et définition de ses constituants.

La figure 13 nous servira de support pour la description du robot DELTA4 et de son fonctionnement.

Ce robot à 4 degrés de liberté est essentiellement un **parallélogramme de l'espace** [CLAVEL 85]; il est principalement constitué d'une "**base fixe**" (1) solidaire d'un bâti support de l'installation (non représenté) et d'une plaque mobile (5); le nom donné à cette dernière pièce est "**nacelle**". La liaison entre la base fixe (1) et la nacelle (5) est assurée par 3 chaînes cinématiques principales; chacune d'elles est formée d'un "**bras**" (2) monté en articulation pivot sur la base fixe et de 2 "**barres parallèles**" (3) munies chacune d'une articulation (4) à chaque extrémité; l'ensemble formé de 2 barres parallèles et des 2 éléments de liaison au bras et à la nacelle sera nommé "**parallélogramme**". Chaque bras (2) est entraîné par un "**moteur de bras**" (7) qui aura le plus souvent la forme d'un ensemble moteur-réducteur-captateur. Le "**préhenseur**" (10) sera monté en pivotement sur la nacelle et entraîné par le moteur (6) par l'intermédiaire de l'"**arbre télescopique**" (8) muni d'une articulation de type cardan (9) à chacune de ses extrémités; cette solution pourra, suivant les cas, être remplacée par d'autres variantes telles que:

- un petit moteur-réducteur monté sur la nacelle,
- un câble flexible tournant entraîné par un moteur fixe sur le bâti; un réducteur monté sur la nacelle (vis tangente par exemple) transmet la rotation du câble au préhenseur,
- un câble travaillant en traction dont l'extrémité côté nacelle est enroulée sur un tambour; un ressort de torsion monté entre la nacelle et le préhenseur assure la tension du câble quel que soit le sens de rotation; le câble est guidé dans une gaine flexible pour assurer une relation constante entre l'extrémité côté moteur et le tambour.

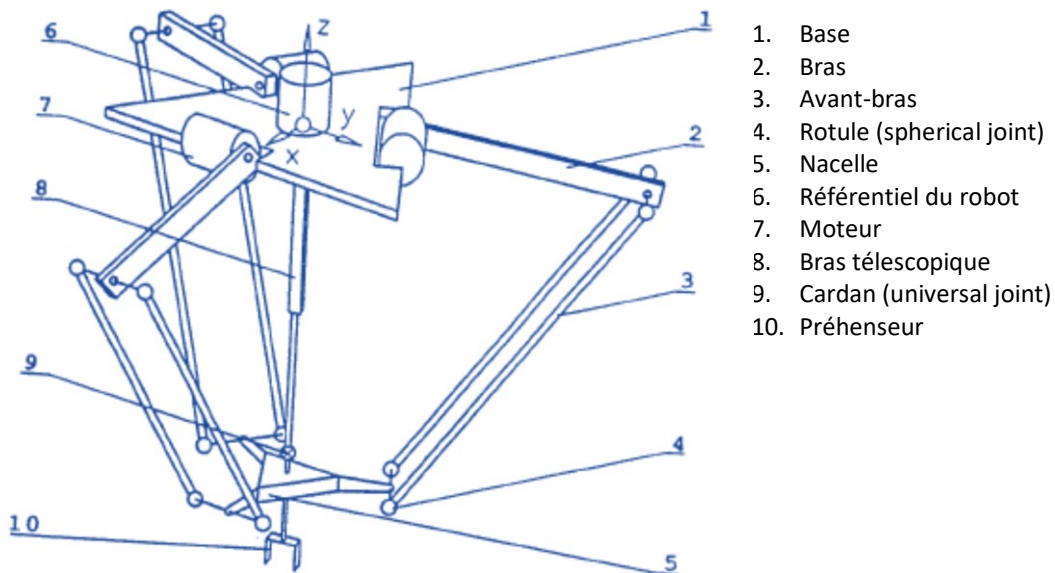


Fig.13 Schéma de principe du robot DELTA4.

L'orientation de la nacelle est constamment assurée par les 3 parallélogrammes comportant chacun 2 petits côtés et 2 grands côtés formés par les barres parallèles; chaque petit côté solidaire de l'extrémité d'un bras reste constamment parallèle à l'axe de rotation du bras considéré; les 3 paires de barres parallèles garantissent que les 3 petits côtés solidaires de la nacelle restent parallèles à ceux solidaires de l'extrémité des bras et donc parallèles aux axes de rotation des bras qui, par construction, sont situés dans un même plan. Les articulations aux extrémités des barres parallèles sont de type rotule.

1.3.6 Mobilité du robot DELTA à 6 barres parallèles.

Un simple examen de la figure 13 montre que cette structure mobile sans le 4e axe est composée de 5 boucles; le compte des mobilités des articulations donne le résultat suivant:

- 3 articulations à $MO=1$ (moteur de bras)
- 12 rotules ($MO=3$)

La mobilité de l'ensemble est donc de: $12 \times 3 + 3 \times 1 - 5 \times 6 = 9$ alors que l'on attendait 3.

Par Grübler.

$$\begin{array}{|l} n = 11 \\ k = 15 \\ MO = 6(11 - 15 - 1) + 12 \times 3 + 3 \times 1 = -30 + 39 = 9. \end{array}$$

Ce résultat est dû au fait qu'avec une rotule à chaque extrémité, chaque barre parallèle peut pivoter autour de son axe longitudinal, ce qui donne 6 degrés de liberté supplémentaires. Ce mouvement intempestif est limité constructivement par l'effet des ressorts de maintien des barres parallèles sur les étriers. Un cardan à l'une des extrémités de chacune des six barres conduirait à la mobilité attendue de 3.

1.3.7 Singularités du robot DELTA

Dans un manipulateur sériel, les positions singulières découlent de la perte de degrés de liberté alors que dans un manipulateur parallèle, elles résultent du gain de un ou plusieurs degrés de liberté [FICHTER 86]. La plupart du temps, le passage par une singularité provoque un hyperguidage pour ensuite passer par la perte de contrôle d'un ou plusieurs degrés de liberté.

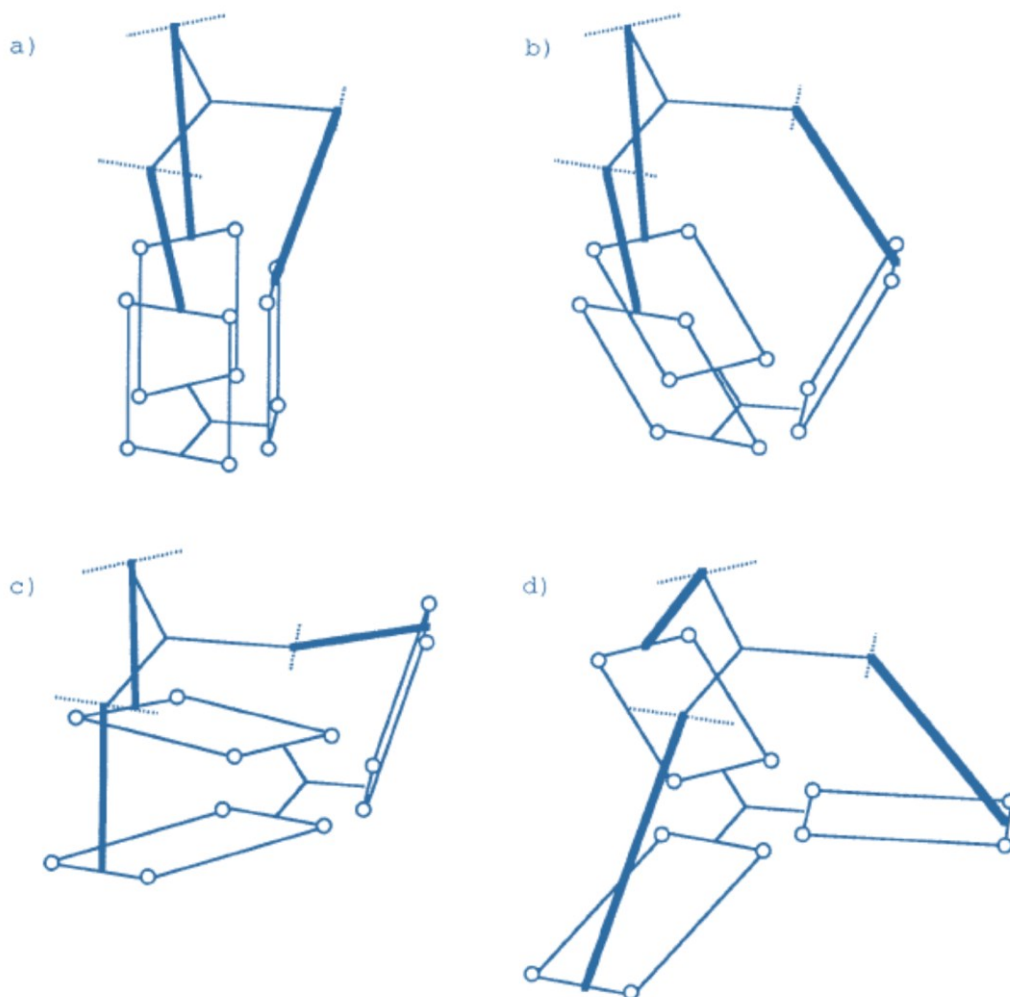


Fig.14 Représentation des 4 types de singularités du robot DELTA.

Les singularités de la structure considérée ont été déterminées à partir de l'analyse de la position relative des 6 barres solidaires de la nacelle; nous considérons que chaque barre transmet uniquement une force dont la ligne d'action est confondue avec la droite reliant les 2 articulations à ses extrémités.

La position de la nacelle est totalement définie et sa stabilité assurée si les conditions suivantes sont respectées:

- les lignes d'action des forces (les barres parallèles dans le cas présent) sont situées dans 3 plans différents non parallèles ;
- 2 lignes d'action au maximum sont parallèles.

Ces conditions mettent en évidence les 4 types de singularités schématisées à la figure 14

- a) lorsque les 6 barres (3 paires) sont toutes parallèles à une même direction (fig.14.a), la nacelle conserve 3 degrés de liberté, soit: déplacement sur une portion de sphère et rotation autour d'un axe perpendiculaire à la nacelle;
- b) si 4 barres (2 paires) sont parallèles (fig.14.b), la nacelle conserve un degré de liberté, soit: déplacement sur un arc de cercle;
- c) si 4 barres (2 paires) sont dans un même plan ou dans 2 plans parallèles (fig.14.c), la nacelle conserve un degré de liberté, soit: rotation définie par l'axe reliant les deux articulations situées entre la nacelle et les deux barres non considérées;
- d) lorsque les 3 parallélogrammes sont situés dans 3 plans parallèles ou confondus (fig.14.d), la nacelle conserve 3 degrés de liberté, soit: 2 rotations d'axes appartenant au plan de la nacelle (axes horizontaux) et translation de faible amplitude perpendiculairement au même plan.

Appendix

1.4 Etude plus complète de la structure parallèle du robot DELTA.

Le but de cette partie est de montrer sur un exemple suffisamment simple une manière d'aborder l'étude plus complète d'un robot parallèle.

Comme déjà mentionné sous 5, l'élément essentiel de la structure mobile du robot DELTA est le **parallélogramme de l'espace** formé de 3 chaînes cinématiques principales reliant la base fixe à la nacelle; la cinématique nécessaire à la rotation du préhenseur ne sera pas abordée ici.

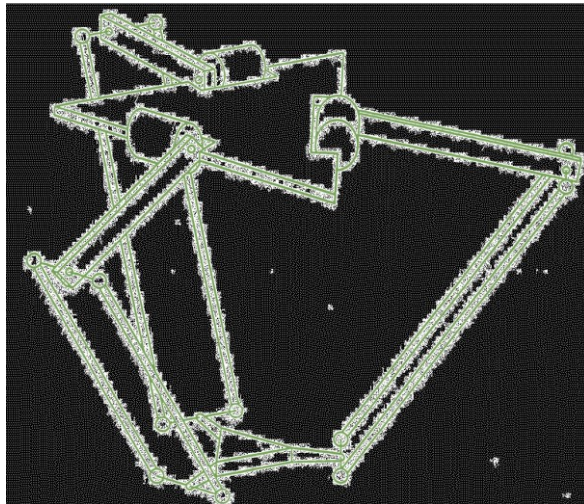


Fig.15 Structure mobile du robot DELTA formant un **parallélogramme de l'espace**.

Au cours de cette partie, nous présenterons les différentes **grandeurs géométriques** liées à cette structure parallèle, puis nous montrerons les **déplacements limites**; ces derniers permettront de mettre en évidence le **volume de travail** de ce robot. Nous étudierons ensuite la relation qui permet, à partir de la position des 3 bras, de déterminer la position de la nacelle (**modèle géométrique direct**); l'opération inverse sera également explicitée (**modèle géométrique inverse**).

Hypothèses simplificatrices.

Lors de toutes les études géométriques et cinématiques, les articulations seront considérées idéales (sans jeu, sans élasticité et sans frottement) et les corps seront supposés géométriquement exacts et parfaitement rigides. Cette dernière hypothèse a été confirmée a posteriori par la détermination des fréquences propres des différents prototypes réalisés (valeurs mesurées: 120 à 250 Hz).

Longueurs paramétriques.

Nous considérons la configuration à symétrie ternaire formée de 3 chaînes cinématiques identiques disposées selon une période de 120° (Cf.Fig.15). Les longueurs paramétriques et les angles caractéristiques de cette structure sont représentés à la figure 16.

RA: distance entre le centre de la base fixe et l'axe de rotation du bras;

- RB:** distance entre le centre de la nacelle et le côté du parallélogramme solidaire de la nacelle;
- LA:** longueur du bras;
- LB:** longueur d'une barre parallèle;
- R :** différence entre les longueurs RA et RB; cette distance définit la position du point A_i; ce dernier est obtenu par une translation d'amplitude RB de la chaîne cinématique i qui amène le point B_i au centre de la nacelle, le point O_i en A_i et le point C_i en C_i'; l'axe de rotation du bras ainsi translaté est nommé a_i.

Angles caractéristiques.

- α_i:** angle entre le i^e bras et le plan de la base fixe; dans la suite, il sera considéré que la base fixe est horizontale; par convention, l'angle α_i est positif lorsque le bras est situé du côté de la nacelle;
- β_i:** angle entre le plan du i^e parallélogramme et le plan horizontal, mesuré dans un plan vertical β_i contenant le bras i;
- γ_i:** angle entre le plan vertical π_i et une des barres du parallélogramme i;
- θ_i:** angle entre le plan π_i et le plan Oxz.

Longueurs paramétriques adimensionnelles.

Afin de généraliser l'étude des relations entre les longueurs paramétriques du robot et ses différentes caractéristiques, nous choisissons de rapporter toutes les dimensions à la longueur de référence LA.

Soit: $r = R/LA$

$$b = LB/LA$$

Dimension globale du robot DELTA.

Pour qualifier la dimension globale DG du robot DELTA, nous avons choisi de considérer comme référence la somme des longueurs LA et LB exprimées en millimètres; cette valeur peut être formulée comme suit:

$$DG = LA(1+b)$$

Par exemple, le prototype n°2 dont LA = 200 mm et LB = 380 mm est un DELTA 580.

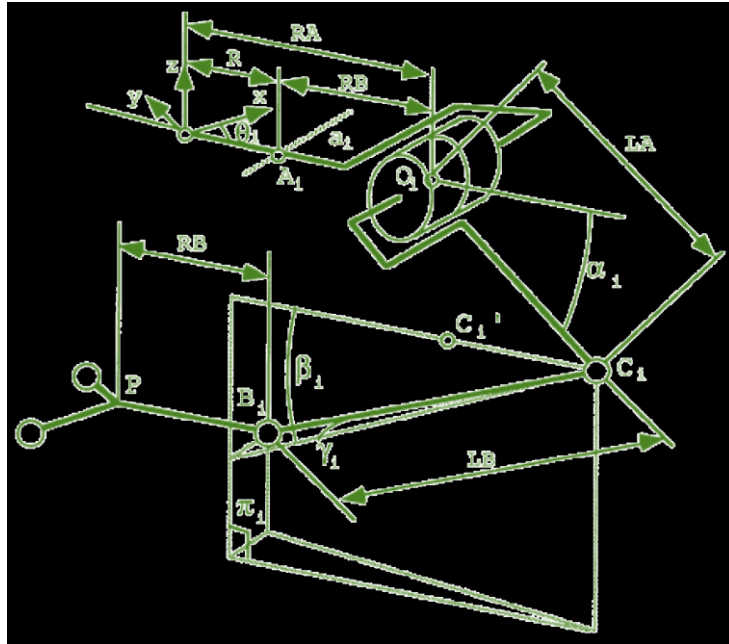


Fig.16. Longueurs paramétriques et angles caractéristiques du robot DELTA; pour simplifier, chaque parallélogramme est représenté par un seul segment.

Simplification de la géométrie pour l'étude.

Lors de la description du fonctionnement du robot, nous avons vu que les 3 orientations de la nacelle sont constantes; sur le plan cinématique, on peut donc considérer le robot équivalent dont une chaîne cinématique est représentée à la figure 17; on l'obtient en traduisant les ensembles bras-barres parallèles comme mentionné dans la définition de R.

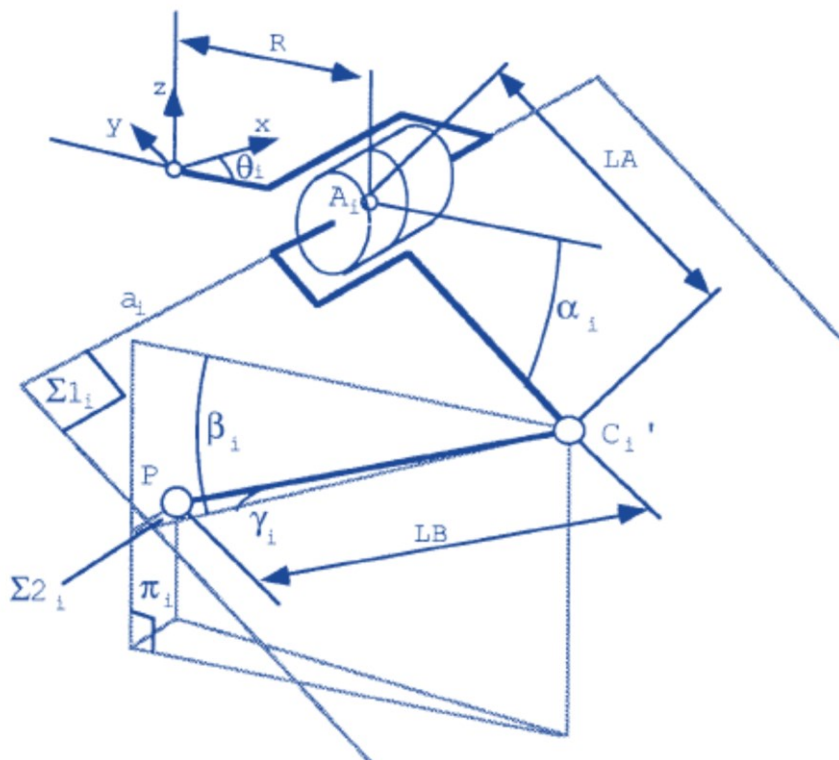


Fig.17. Chaîne cinématique équivalente en considérant que la nacelle est réduite à un point.

Volume de travail.

Limites géométriques.

Par le fait que les dimensions des constituants sont finies et qu'ils ont des mouvements relatifs restreints, le déplacement de la nacelle est limité à une portion de l'espace. Il est encore nécessaire d'imposer des restrictions à certains mouvements pour éviter les ambiguïtés lors du calcul des transformations de coordonnées et les singularités mentionnées précédemment.

Limite 1: $-\gamma_{\max} \leq \gamma_i \leq \gamma_{\max}$

Origine : les contraintes de construction des articulations aux 2 extrémités des barres parallèles limitent cet angle à $\gamma_{\max} = 40^\circ$;

limite 2: $30^\circ \leq \alpha_j + \beta_j \leq 180^\circ$

Pour les 2 raisons suivantes:

- éviter les interférences entre le bras et les barres parallèles ainsi qu'entre les barres parallèles et les moteurs de bras lorsque $\alpha_j + \beta_j$ est petit;
- éviter les ambiguïtés de transformation de coordonnées qui se produisent lorsque l'angle $(\alpha_j + \beta_j)$ devient supérieur à 180° ; ceci donne 2 ensembles de consignes articulaires pour un seul point de l'espace opérationnel.

Volume de travail.

Le volume de travail est la zone que le point P, centre de la nacelle, peut atteindre. Le montage d'un outil provoquera un décalage du point de travail vers le bas et une translation correspondante du volume de travail.

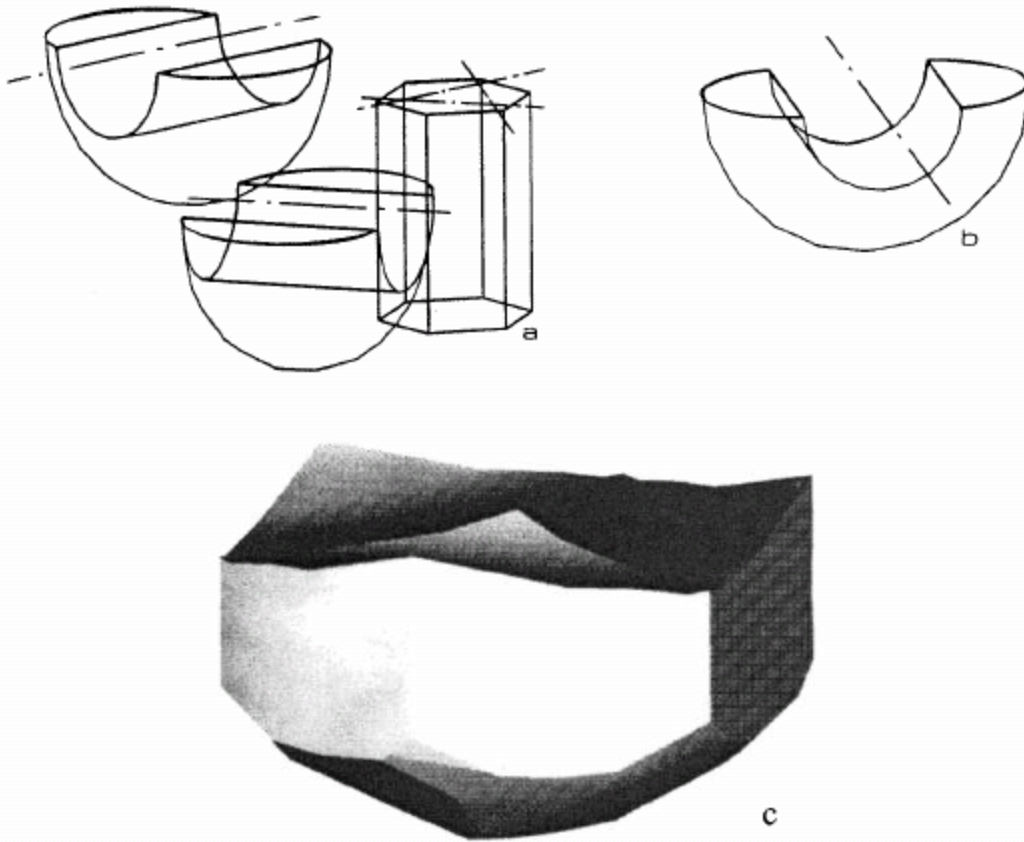


Fig.18. Le volume de travail du robot DELTA (en c) est donné approximativement par l'intersection du prisme hexagonal droit a) avec les 3 corps de révolution b) dont les axes sont indiqués en a).

Diamètre D du cylindre inscrit dans le volume de travail:

Cette dimension D est directement donnée par la limite 1:

$$D = 2 LB \sin \gamma_{\max}$$

si on rapporte cette valeur à LA:

$$d = D/LA = 2 b \sin \gamma_{\max} \approx 1,3 b \text{ pour } \gamma_{\max} = 40^\circ$$

Il est intéressant de remarquer que d ne dépend que de b pour un angle γ_{\max} donné.

Surface de travail:

la valeur de d déterminée ci-dessus permet de calculer la surface S de l'hexagone, projection du volume de travail sur un plan horizontal; la valeur adimensionnelle de cette surface sera donnée par $s = S/LA^2$.

$$s = 3 \frac{b^2 \sin^2 \gamma_{\max}}{\cos 30^\circ} = 2 \sqrt{3} \sin^2 \gamma_{\max} b^2$$

$$s = 1,431 b^2 \quad \text{pour } \gamma_{\max} = 40^\circ$$

Hauteur du volume de travail:

Soient Z_h et Z_b les coordonnées selon z respectivement du haut et du bas du volume de travail; la hauteur H du volume de travail sera donnée par: $Z_h - Z_b$; z_h et z_b sont les valeurs adimensionnelles de Z_h et Z_b .

Selon le schéma de la figure 19, on obtient directement:

$$z_h = -\sqrt{1+b^2-2b \cos(\alpha_i+\beta_i)_{\min}}$$

$$z_h = -\sqrt{1+b^2- b\sqrt{3}} \quad \text{pour } (\alpha_i+\beta_i)_{\min}=30^\circ$$

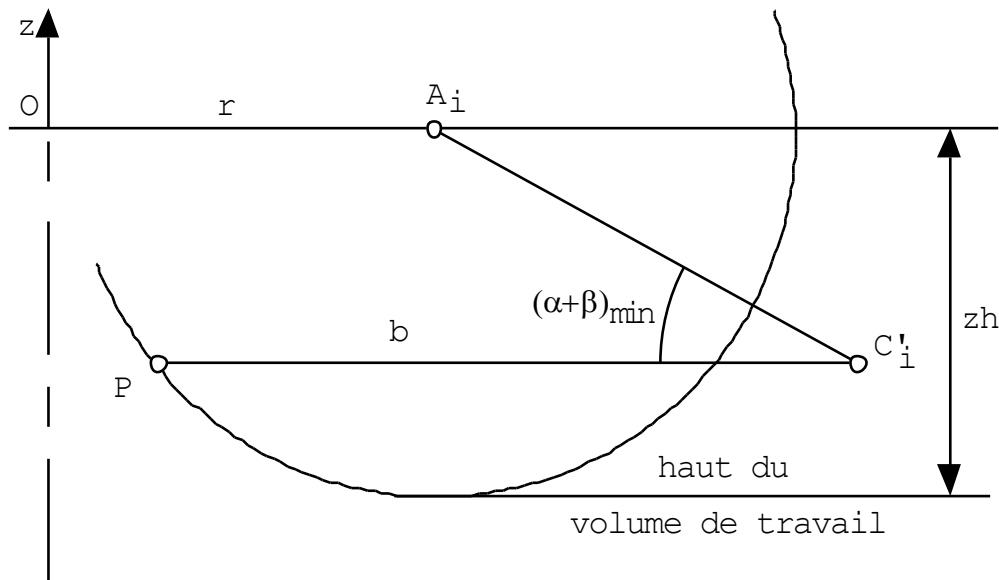


Fig.19 Détermination de la limite supérieure du volume de travail.

Pour déterminer la limite inférieure du volume de travail (cote z_b), reportons-nous à la figure 20.

Le point d'intersection de la surface générée par l'arc de cercle centré en C'_i par une rotation d'axe a_j (Cf.Fig.17) avec $\alpha+\beta=180^\circ$ avec l'arête verticale du prisme hexagonal opposée à chaque bras est appelé T ; l'intersection de la même surface avec les 2 arêtes verticales adjacentes donne les points T' ; vu la symétrie ternaire, les points T' définis par chacun des bras sont confondus 2 à 2.

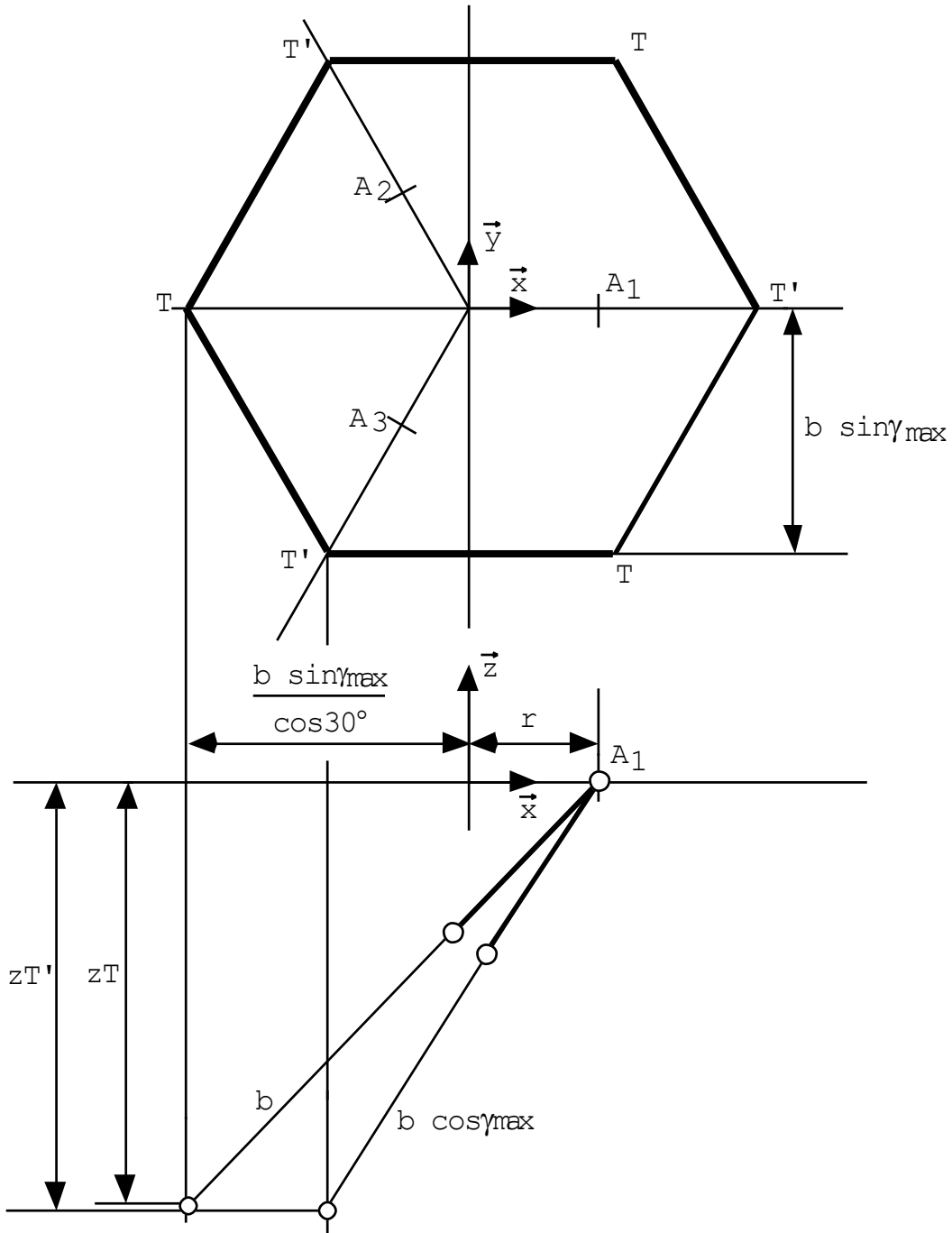


Fig.20- Détermination de la limite inférieure du volume de travail $z_b = \max.(z_T, z_{T'})$.

Les coordonnées de T et T' selon z ont la valeur suivante:

$$z_T = -\sqrt{(1+b)^2 - \left(r + 2 \frac{b \sin \gamma_{\max}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

$$z_{T'} = \sqrt{(1+b\cos\gamma_{\max})^2 - \left(r + \frac{b \sin\gamma_{\max}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

La cote z_b sera la valeur maximum de z_T et $z_{T'}$.

On remarque que l'augmentation de l'angle γ_{\max} conduit à une augmentation de surface de travail (voir: "surface de travail"), mais diminue la hauteur sur laquelle le prisme hexagonal est complet; la faible hauteur de la zone de travail gagnée par un angle γ_{\max} nettement plus élevé que 40° rend cette démarche peu intéressante sur le plan utilisation et complique sérieusement la construction des articulations.

On peut tirer des 2 expressions précédentes la condition pour que $z_T = z_{T'}$:

$$r = \sqrt{3} \frac{1 - \cos\gamma_{\max}}{\sin\gamma_{\max}}$$

Pour $\gamma_{\max}=40^\circ$, $r=0,63$ pour que les points T et T' soient situés à la même hauteur; c'est dans cette condition que l'on obtient la forme de la calotte inférieure du volume de travail la plus régulière.

h aura donc la valeur suivante:

si $r \geq 0,63$

$$h = \sqrt{(1+b)^2 - \left(r + 2 \frac{b \sin\gamma_{\max}}{\sqrt{3}}\right)^2} - \sqrt{1+b^2 - b\sqrt{3}}$$

si $r \leq 0,63$

$$h = \sqrt{(1+b\cos\gamma_{\max})^2 - \left(r + \frac{b \sin\gamma_{\max}}{\sqrt{3}}\right)^2} - \sqrt{1+b^2 - b\sqrt{3}}$$

Pour mieux appréhender le volume de travail complet avec la calotte inférieure, il est intéressant d'en connaître la hauteur maximum h_{\max} ; celle-ci est donnée par la distance entre le haut du volume de travail (z_h) et le point le plus bas que la structure mobile peut atteindre; ce point est situé sur l'axe Oz à la cote adimensionnelle: $\sqrt{(1+b)^2 - r^2}$, d'où:

$$h_{\max} = \sqrt{(1+b)^2 - r^2} - \sqrt{1+b^2 - b\sqrt{3}}$$

Le tableau 21 et la figure 22 donnent une vue synthétique de z_h , h , h_{\max} , d , s et v (égal à $h.s$); ces valeurs sont déterminées avec $\gamma_{\max}=40^\circ$ et $(\alpha_i+\beta_i)_{\min}=30^\circ$.

r	b	zh	h	hmax	d	s	v
	1,75	-1,02	1,06	1,68	2,25	4,38	4,67

	2	-1,24	1,01	1,71	2,57	5,72	5,79
0,5	2,25	-1,47	0,95	1,74	2,89	7,24	6,87
	2,5	-1,71	0,88	1,75	3,22	8,94	7,87
	2,75	-1,95	0,81	1,76	3,54	10,82	8,76
	3	-2,19	0,74	1,77	3,86	12,88	9,47
	1,75	-1,02	0,94	1,65	2,25	4,38	4,14
	2	-1,24	0,89	1,69	2,57	5,72	5,09
0,63	2,25	-1,47	0,83	1,71	2,89	7,24	5,98
	2,5	-1,71	0,76	1,73	3,22	8,94	6,76
	2,75	-1,95	0,68	1,74	3,54	10,82	7,4
	3	-2,19	0,61	1,76	3,86	12,88	7,84
	1,75	-1,02	0,76	1,61	2,25	4,38	3,34
	2	-1,24	0,71	1,65	2,57	5,72	4,04
0,8	2,25	-1,47	0,64	1,68	2,89	7,24	4,65
	2,5	-1,71	0,57	1,69	3,22	8,94	5,11
	2,75	-1,95	0,5	1,71	3,54	10,82	5,4
	3	-2,19	0,42	1,72	3,86	12,88	5,46
	1,75	-1,02	0,49	1,54	2,25	4,38	2,17
	2	-1,24	0,44	1,58	2,57	5,72	2,53
1	2,25	-1,47	0,38	1,62	2,89	7,24	2,77
	2,5	-1,71	0,32	1,64	3,22	8,94	2,82
	2,75	-1,95	0,25	1,66	3,54	10,82	2,66
	3	-2,19	0,17	1,68	3,86	12,88	2,23

Tableau 21 Influence de r et b sur les dimensions (h , h_{max} , $d=D/LA$, $s=S/LA^2$, $v=V/LA^3=sh$) et la position (zh) du volume de travail.

Exemples de robots réalisés et volume de travail correspondant:

Les volumes de travail donnés ne tiennent pas compte d'une éventuelle limitation provoquée par l'entraînement du 4^e axe.

Micro-DELTA 240

RA=67 mm

RB=17 mm

$r=0,625$

LA=80 mm

LB=160 mm

$b=2$

D=206 mm

H=71,5 mm

$H_{max}=136$ mm

$S=3,66 \cdot 10^4$ mm²

$V=2,62 \cdot 10^6$ mm³

DELTA 580

RA=150 mm

RB=25 mm

$r=0,625$

LA=200 mm

LB=380 mm

$b=1,9$

D=489 mm

H=183 mm

$H_{max}=336$ mm

$S=20,7 \cdot 10^4$ mm²

$V=37,9 \cdot 10^6$ mm³

DELTA 740

RA=194 mm

RB=30 mm

r=0,631

LA=260 mm

LB=480 mm

b=1,846

D=617 mm

H=240 mm

Hmax=435 mm

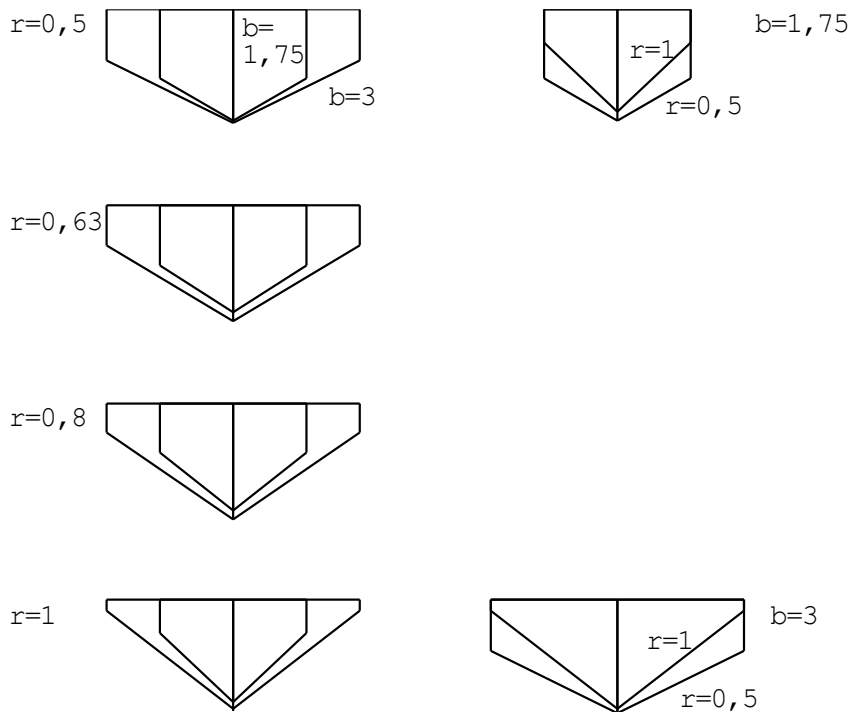
S=33 10⁴ mm²V=79,2 10⁶ mm³

Fig.22 Représentation simplifiée de l'influence de r et b sur les dimensions h et d du volume de travail.

1.4.1 Modèles géométriques.

1.4.1.1 Introduction.

Une caractéristique essentielle du robot DELTA est le fait que sa structure mobile est un parallélogramme de l'espace, c'est-à-dire que quels que soient ses mouvements et sa position, il conserve constantes les 3 orientations de sa nacelle sans aucune action de moteurs.

Une des applications typiques du robot DELTA est le conditionnement de composants légers; cette opération consiste essentiellement à prendre une pièce à une position donnée et la déposer à une autre position en suivant une trajectoire compatible avec les contraintes de prise et d'accostage et celles dépendant des obstacles constitués par les divers éléments de la périphérie. Vu la géométrie particulière de ce robot, il est illusoire de programmer les trajectoires par l'apprentissage de quelques points.

Les modèles géométriques direct et inverse sont les relations qui expriment la situation de l'organe terminal du robot (la nacelle dans le cas présent) en fonction de la configuration du mécanisme (coordonnées articulaires) et inversement. La connaissance des modèles géométriques direct et inverse est donc absolument indispensable pour programmer le robot DELTA dans l'espace opérationnel (points de prise et dépose ainsi que trajectoire) et bénéficier ainsi totalement de ses propriétés. Ces modèles seront également indispensables pour la partie dynamique.

Le fait que la nacelle n'effectue que des mouvements de translation permet une formulation simple des modèles géométriques. Nous considérons la simplification de représentation décrite sous 1.3.8, fig.17 qui réduit la nacelle à un point.

Sur cette base, Sternheim [STERNHEIM 87] a établi une méthode pour déterminer les modèles direct et inverse du robot DELTA; pour cette opération, il fait intervenir les angles β_j et γ_j (Cf. Fig.17) qui définissent les directions des barres parallèles.

Nous proposons ci-dessous une méthode de la géométrie analytique qui consiste à exprimer les intersections d'une sphère avec 3 cercles.

Nous nous référons à la figure 17; le point P peut être considéré comme le centre d'une sphère de rayon LB; les points A_j sont les centres de cercles de rayon LA appartenant aux plans π_j et les points C_j' sont donnés par les intersections des trois cercles de rayon LA avec la sphère de rayon LB centrée en P.

Coordonnées des points C_j :

$$\left| \begin{array}{l} [(R + LA \cos\alpha_i)\cos\theta_i, (R + LA \cos\alpha_i)\sin\theta_i, - LA \sin\alpha_i] \end{array} \right.$$

Equation de la sphère de centre P(x,y,z) et de rayon LB:

$$\left| \begin{array}{l} (X - x)^2 + (Y - y)^2 + (Z - z)^2 = LB^2 \end{array} \right.$$

Les points C_j appartiennent à la sphère:

$$\left| \begin{array}{l} [(R + LA \cos\alpha_j)\cos\theta_j - x]^2 + [(R + LA \cos\alpha_j)\sin\theta_j - y]^2 + [- LA \sin\alpha_j - z]^2 = LB^2 \\ x^2 - 2x(R + LA \cos\alpha_j)\cos\theta_j + y^2 - 2y(R + LA \cos\alpha_j)\sin\theta_j + z^2 + 2z LA \sin\alpha_j = LB^2 - LA^2 - R^2 - 2 R LA \cos\alpha_j \end{array} \right. \text{[eq.1]}$$

Ces trois équations peuvent être résolues selon x, y, z pour le modèle direct et selon α_j pour le modèle inverse. Afin de conserver les possibilités de contrôle dimensionnel des différentes équations, nous n'introduisons pas ici les facteurs adimensionnels r et b.

1.4.1.2 Modèle géométrique direct.

En posant:

$$D_j = - LB^2 + LA^2 + R^2 + 2 R LA \cos\alpha_j$$

$$E_i = 2(R + LA \cos \alpha_i) \cos \theta_i$$

$$F_i = 2(R + LA \cos \alpha_i) \sin \theta_i = E_i \operatorname{tg} \theta_i$$

$$G_i = -2 LA \sin \alpha_i$$

$$H_1 = E_1 G_2 - E_1 G_3 - E_2 G_1 + E_2 G_3 + E_3 G_1 - E_3 G_2$$

$$H_2 = -E_1 F_2 + E_1 F_3 + E_2 F_1 - E_2 F_3 - E_3 F_1 + E_3 F_2$$

$$H_3 = -E_1 D_2 + E_1 D_3 + E_2 D_1 - E_2 D_3 - E_3 D_1 + E_3 D_2$$

$$H_4 = F_1 D_2 - F_1 D_3 - F_2 D_1 + F_2 D_3 + F_3 D_1 - F_3 D_2$$

$$H_5 = -F_1 G_2 + F_1 G_3 + F_2 G_1 - F_2 G_3 - F_3 G_1 + F_3 G_2$$

Alors :

$$\left| \begin{array}{l} x = z \frac{H_5}{H_2} + \frac{H_4}{H_2} \\ y = z \frac{H_1}{H_2} + \frac{H_3}{H_2} \end{array} \right. \quad \text{[eq.2]}$$

$$\left| \begin{array}{l} x = z \frac{H_5}{H_2} + \frac{H_4}{H_2} \\ y = z \frac{H_1}{H_2} + \frac{H_3}{H_2} \end{array} \right. \quad \text{[eq.3]}$$

[eq.2] et [eq.3] dans [eq.1] pour $i=1$

$$\left| \begin{array}{l} z = \frac{-M \pm \sqrt{M^2 - 4 L N}}{2 L} \end{array} \right. \quad \text{[eq.4]}$$

avec:

$$\left| \begin{array}{l} L = \frac{H_5^2 + H_1^2}{H_2^2} + 1 \\ M = 2 \frac{H_5 H_4 + H_1 H_3}{H_2^2} - \frac{H_5 E_1 + H_1 F_1}{H_2} - G_1 \\ N = \frac{H_4^2 + H_3^2}{H_2^2} - \frac{H_4 E_1 + H_3 F_1}{H_2} + D_1 \end{array} \right.$$

1.4.1.3 Modèle géométrique inverse:

Considérant, $Q_i = 2 x \cos \theta_i + 2 y \sin \theta_i$

$$S = \frac{1}{LA} (-x^2 - y^2 - z^2 + LB^2 - LA^2 - R^2)$$

La résolution des équations [eq.1] donne l'expression suivante :

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha_i}{2} = \frac{-2z \pm \sqrt{4z^2 + 4R^2 - S^2 + Q_i^2 \left(1 - \frac{R^2}{LA^2}\right)} + Q_i \left(-2\frac{RS}{LA} - 4R\right)}{-2R - S - Q_i \left(\frac{R}{LA} - 1\right)}$$

Remarques au sujet des résultats obtenus pour les modèles géométriques direct et inverse:

- fonction de la géométrie et de l'origine choisie pour l'angle α_i , la valeur absolue de ce dernier est toujours inférieure à 180° , donc $\text{tg}(\alpha_i/2)$ ne peut pas prendre la valeur infini; toutefois, des singularités mathématiques de type 0/0, génératrices de bruit numérique peuvent apparaître; afin d'écarter ce problème, Codourey [CODOUREY 91] a utilisé avec des prémisses identiques, une résolution différente du modèle géométrique inverse; toutefois, cette résolution est légèrement plus exigeante en temps de calcul;
- les deux valeurs obtenues pour chaque α_i proviennent du fait que chaque arc de cercle coupe la sphère en deux points; la valeur utile est la plus petite des deux; l'autre valeur correspond à une position où l'angle $\alpha_i + \beta_i$ est supérieur à 180° ; on prendra donc le signe "-" dans l'expression de $\text{tg}(\alpha_i/2)$;
- les deux valeurs obtenues pour chacune des coordonnées x , y , z , dans le cadre de la transformation directe ont pour origine le fait que par les 3 points C_i' peuvent passer deux sphères de rayon donné; leurs centres respectifs sont placés symétriquement par rapport au plan défini par les trois points considérés; la valeur minimum de z sera celle à prendre en considération; on choisira le signe "-", dans l'expression [3.4.4] ;
- pour accélérer les calculs numériques, on aura avantage à choisir un des angles θ_i égal à 0 ; nous prendrons donc $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 120^\circ$ et $\theta_3 = 240^\circ$; avec ces valeurs, $Q_1 = 2x$, $F_1 = 0$, H_2 , H_4 et H_5 ont 2 termes en moins.

1.5 Bibliographie

- [AMIRAT 89] M-Y.Amirat, "Contribution à la modélisation et à la commande par retour d'efforts des robots parallèles", thèse de doctorat de l'Université Paris VI, 1989
- [ASEA 85] I.Oestman, C-A Allared, U.Holmqvist, "Pendulum robot", reprint of Asea Journal 3.4.1985
- [BEHI 88] F.Behi, "Kinematic analysis for a six-degree-of-freedom 3-PRPS parallel mechanism", vol.4, num.5, p.561-565, IEEE Journal of Robotics and Automation, 1988
- [BURCKHARDT 88] C-W.Burckhardt, S-M.Liu, "Scaling rules in robotics and a design of a mini-robot", proceedings of international symposium on automation and robotics in production engineering, Xian, China, p.162-169, 1988
- [CLAVEL 85b] R.Clavel, "Dispositif pour le déplacement et le positionnement d'un élément dans l'espace", brevet suisse n° 672089 A5, priorité décembre 1985
- [CLAVEL 88a] R.Clavel, "DELTA, a fast robot with parallel geometry", proc. of the 18th Int. Symposium on Industrial Robots, p.91-100, IFS Publications, 1988
- [CLAVEL 89a] R.Clavel, "Une nouvelle structure de manipulateur parallèle pour la robotique légère", APII, vol.23, No 6, p.501-519, AFCET, 1989
- CLAVEL 91] R.Clavel, "Conception d'un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté", thèse de doctorat No 925, EPFL, 1991
- [CODOUREY 91] A.Codourey, "Contribution à la commande des robots rapides: application au robot DELTA à entraînement direct", thèse de doctorat No 922, EPFL, 1991
- [DENAVID 55] J.Denavit, R-S.Hartenberg, "A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices", J. of applied Mechanics, 1955
- [DWOLATZKY 88] B.Dwolatzki, G-S.Thornton, "The GEC Tetrabot - a serial-parallel topology robot: control design aspects", Proc. Control 88 International Conference, Conference Publication No 285 IEE, 1988
- [FICHTER 86] E-F.Fichter, "A Stewart platform-based manipulator: general theory and practical construction", the International Journal of Robotics Research, vol.5, No.2, p.157-182, 1986
- [FLORY 67] J-F.Flory, "Parallel platform linkages for shock isolation systems", brevet USA 68, priorité juin 1967
- [GOUGH 62] V-E.Gough, S-G.Whitehall, "Universal tyre test machine", Proc.9th Intern. Automobile Technical Congress, p.117-137, FISITA, IMechE (London), 1962

- [HUNT 83] K-H.Hunt, "Structural kinematics of in-parallel-actuated robot-arms", Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Transactions of the ASME, vol 105, p.705 à 712, 1983
- [INOUE 83] H.Inoue, K.Yoshida, Y.Kida, "Positioning mechanism", brevet européen 1984; priorité juin 1983
- [KIMURA 83] M.Kimura, "Bras extensible et rétractable", demande de brevet d'invention à l'Institut national de la propriété industrielle, Paris 1984; priorité août 1983
- [KRUEGER 85] H.Krueger-Beuster, "Gelenkelement für Manipulatoren", demande de brevet d'invention au deutsches Patentamt, Munich, avril 1985
- [KWASNY 87] N.Kwasny, "structure triangulée animée: 24 degrés de liberté, 24 t de charge utile", No 37, p.27-30, Bureaux d'études Automatisation, CEPIT Paris 87
- [LAMBERT 83] M.Lambert, "Mécanisme polyarticulé rétractile", demande de brevet d'invention à l'Institut national de la propriété industrielle, Paris, mars 1983
- [LANDE 78] M-A.Lande, R.David, "Articulation pour bras de manipulateur", demande de brevet européen 1979; priorité septembre 1978
- [LIU 90] S-M.Liu, "Etude et conception de petits robots industriels: réalisation du robot miniature "Colibri"", thèse de doctorat No 888, EPFL, 1990
- [PIERROT 90] F.Pierrot, Cl.Reynaud, A.Fournier, "DELTA: a simple and efficient parallel robot", Robotica volume 8, p.105-109, Cambridge University Press, 1990
- [POLLARD 38] W-L-V.Pollard, "Position controlling apparatus", brevet USA 1942; priorité avril 1938
- [SHUM 81] L-Y.Shum, "Multi-arm robot", brevet USA 1983; priorité mai 1981
- [SIMUNOVIC 84] S-N.Simunovic, "Robotic manipulator", brevet USA 86, priorité juin 84
- [STERNHEIM 87] F.Sternheim, "Computation of the direct and inverse geometric models of the DELTA4 parallel robot", Robotersysteme, vol.3, p.199-203, Springer, 1987
- [STEWART 65] D.Stewart, "A platform with six degree of freedom", Proc. Instn. Mech. Engrs, vol.180, pt.1, N0.15, p.371-378, 1965-66