

HEXAPODES DE POSITIONNEMENT DE PRÉCISION

Anne DUGET^{1*}, Thierry ROUX¹, Pierre NOIRE¹, Olivier LAPIERRE¹

¹ SYMETRIE, 10, allée Charles Babbage, 30000 Nîmes, France

*anne.duget@symetrie.fr

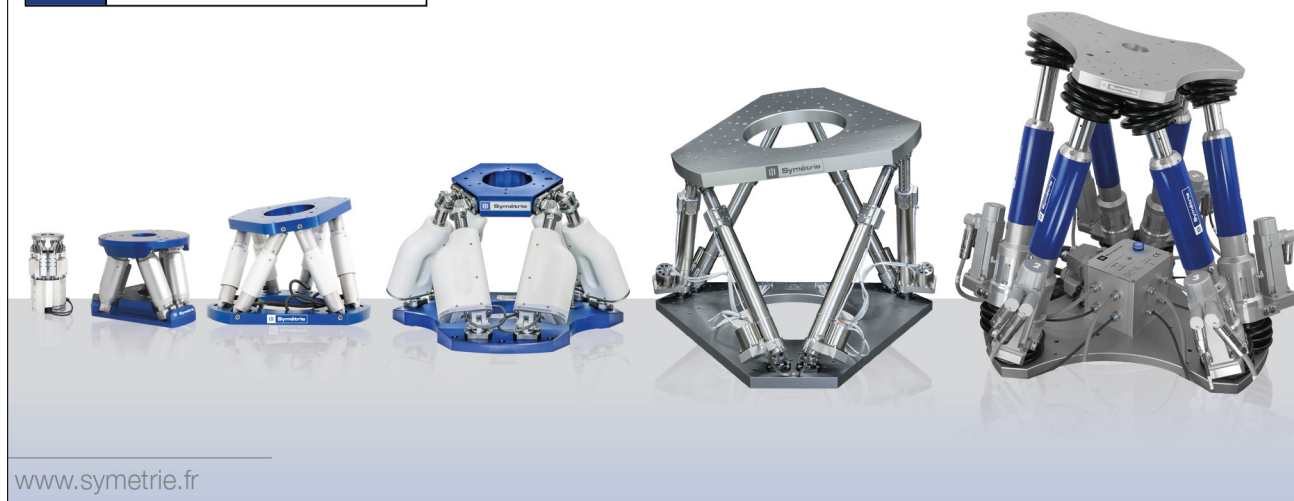


L'hexapode est un robot parallèle permettant la mise en position d'objets suivant les six degrés de liberté (trois translations Tx, Ty, Tz et trois rotations Rx, Ry, Rz). Au milieu du xx^e siècle, les premiers hexapodes ont servi à tester des pneus ou comme simulateurs de vol. Dans les années 1990, grâce à l'évolution des composants électroniques et à l'augmentation des capacités de calcul, l'arrivée de contrôleurs abordables et performants a permis leur essor. Nous verrons dans cet article comment un hexapode est constitué et étudierons les critères de sélection les plus pertinents avant de décrire quelques exemples d'applications.

<https://doi.org/10.1051/photon/202211257>



La plus large gamme d'hexapodes de précision



www.symetrie.fr

L'architecture de l'hexapode consiste en une plateforme fixe et une plateforme mobile reliées par six actionneurs linéaires en parallèle équipés d'une rotule ou d'un cardan à leurs extrémités [1]. Cette disposition de six actionneurs formant un système triangulé présente de nombreux avantages que nous détaillerons plus loin. En modifiant la géométrie d'un hexapode, c'est-à-dire la taille des plateaux, la longueur des vérins, la position et l'angle d'implantation des articulations, il est possible de changer le volume de travail. Puis le dimensionnement des composants est effectué en fonction de la capacité de charge et de la précision souhaitée. La plupart des hexapodes peuvent fonctionner à la verticale, à l'horizontale ou suivant n'importe quelle orientation. La capacité de charge à l'horizontale sera cependant moindre car les efforts dans les actionneurs sont alors plus importants.

Pour vérifier que l'hexapode choisi répond aux besoins en courses et en charge, il est recommandé d'utiliser un logiciel de simulation fourni sur le site internet de la plupart des fabricants. Dans ce type de logiciel, après avoir sélectionné un modèle, il faut entrer les principaux

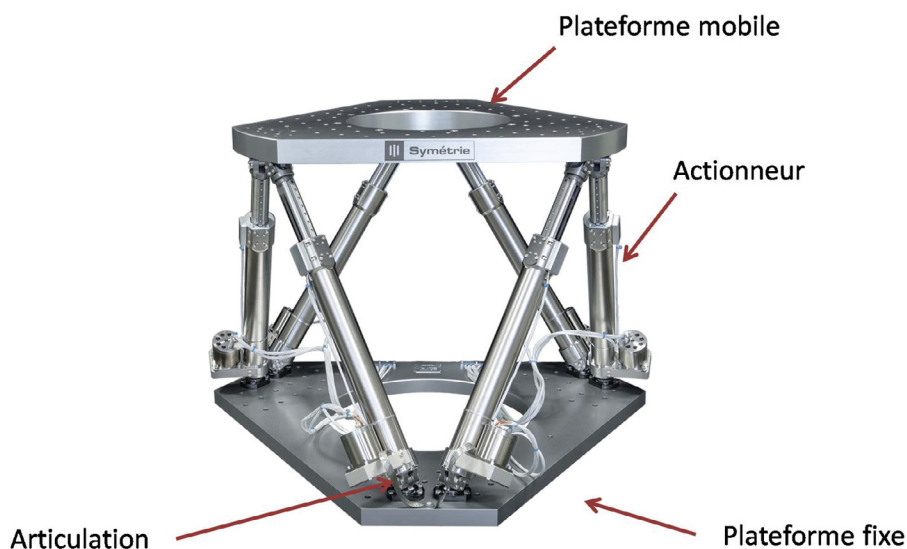
paramètres de l'application : la charge embarquée, la position de son centre de gravité, l'orientation de l'hexapode et le centre de rotation des mouvements. Puis le logiciel vérifie que les courses souhaitées sont réalisables par le modèle choisi. Sur leurs documentations, les fabricants indiquent les courses maximales réalisables axe par axe lorsque les autres axes sont en position milieu (zéro). C'est la seule façon d'exprimer simplement les courses d'un hexapode car la capacité d'un axe est dépendante des cinq autres. Cependant, il n'est pas facile pour l'utilisateur de savoir si les courses cumulées souhaitées pour son application sont réalisables par le modèle présélectionné. Les logiciels de simulation sont donc très utiles pour vérifier le choix d'un hexapode. Certains fabricants proposent de réaliser un hexapode sur mesure si aucun modèle standard ne répond au besoin. À présent, nous allons exposer les principaux éléments d'un hexapode et voir sur quels critères ils peuvent être sélectionnés.

Les principales technologies de moteurs électriques sont les moteurs pas à pas, les moteurs à courant

continu à balais (couramment appelés moteurs DC), les moteurs à courant continu sans balais (*brushless*) et les piézoélectriques. Les moteurs pas à pas sont peu coûteux, ont une forte capacité de couple et permettent l'irréversibilité du système lorsqu'ils sont associés à un réducteur à fort ratio de réduction. Ils peuvent être utilisés sans codeur. Mais ils chauffent davantage que les autres types de moteurs et leur vitesse est limitée. Les moteurs DC ont une vitesse plus élevée et sont utilisés pour des applications avec des charges plus légères avec un bon rapport qualité prix. Plus performants mais plus chers, les moteurs brushless apportent une meilleure fiabilité car ils ne contiennent pas de balais. Ils permettent aussi une dynamique plus élevée et chauffent moins que les moteurs pas à pas, ce qui est un avantage pour les applications où la stabilité est importante et où les mouvements sont fréquents. Les moteurs piézoélectriques inertiels ont des résolutions de quelques nanomètres mais une capacité de charge bien plus faible. On les retrouve surtout sur des hexapodes de petite taille.

Les capteurs installés sur les actionneurs permettent de connaître leur position. Il en existe principalement deux types : les codeurs incrémentaux et les codeurs absolus. Les codeurs absolus apportent un grand confort d'utilisation, il n'est pas nécessaire de réaliser une prise d'origine qui peut être un processus gênant pour l'application, puisqu'elle implique un mouvement des six actionneurs pour chercher un capteur de référence. Les codeurs absolus ou incrémentaux peuvent être rotatifs ; directement intégrés au moteur, ou linéaires ; installés tout le long de l'actionneur. Ces derniers permettent une meilleure précision de l'hexapode étant donné que l'on mesure directement l'allongement de l'actionneur et que l'on élimine les défauts venant de la

Figure 1. Principaux éléments d'un hexapode - Crédits : Symétrie



VOTRE TABLE ÉLEVATRICE PEUT-ELLE FAIRE ÇA?



La PRO-SV d'Aerotech

- est actuellement la table élévatrice la plus précise du marché
- est la seule table élévatrice avec une grande course et une masse embarquée pouvant atteindre 60 kg.
- est facile à intégrer dans un système multiaxes avec des performances dynamiques

La PRO-SV est idéale pour

- les applications qui ont un volume limité en hauteur
- pour le déplacement vertical dans un empilement de plusieurs tables

Exemples d'application

- Positionnement de l'échantillon devant la ligne de faisceau de synchrotron
- Inspection de wafers
- Métrologie de surface



Voyez par vous-même sur uk.aerotech.com/prosv

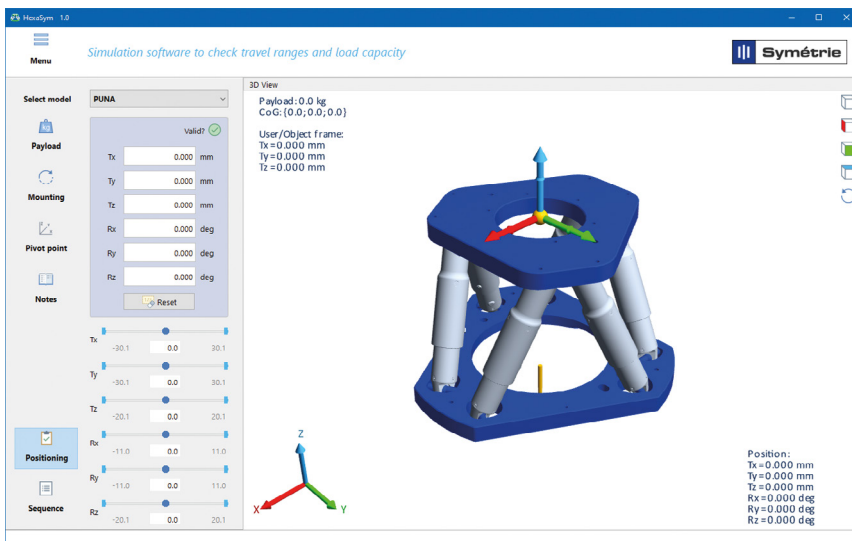


Figure 2. Logiciel de simulation permettant de tester les capacités d'un hexapode - Crédits : Symétrie

transmission entre le moteur et la vis. Ainsi, en plus de la souplesse d'utilisation, un capteur linéaire absolu apportera une meilleure précision. La qualité de l'hexapode est aussi tributaire de celle de ses articulations. Les articulations sphériques sont très utiles dans des applications ayant une orientation verticale car

elles ne fonctionnent correctement qu'en compression. Les articulations de type cardan peuvent être utilisées dans toutes les orientations. Enfin, les articulations à lames flexibles sont parfois utilisées pour des applications demandant de très faibles courses et une haute résolution en éliminant les frottements internes. [2] Le ●●●

Figure 3. Architecture parallèle motorisée par des platines piézoélectriques - Crédits : Smaract



contrôle commande est également un élément essentiel pour la qualité d'un hexapode. Le contrôleur est l'organe intelligent en charge du pilotage de l'hexapode. Grâce aux algorithmes de transformation de cinématique inverse, il réalise les conversions entre la position exprimée dans le référentiel XYZ de l'utilisateur et les longueurs correspondantes des actionneurs. Ces opérations sont transparentes pour l'utilisateur. La machine vérifie que les positions demandées sont dans l'espace de déplacement de l'hexapode, suivant les limites fixées par le fabricant ou par l'utilisateur. Selon les besoins, il est possible de commander en point à point ou en suivant une trajectoire plus complexe. Le contrôle de l'hexapode peut être effectué grâce aux interfaces graphiques utilisateurs fournies par les fabricants ou *via* d'autres logiciels. Le pilotage de l'hexapode peut être intégré dans un environnement scientifique ou industriel *via* divers langages de programmation (C, Python, LabVIEW...) et interfaces (Ethernet, EtherCAT, Profibus...). Les performances de positionnement d'un hexapode sont généralement déterminées par la résolution, la répétabilité et la justesse de déplacement.

- La résolution est considérée comme le mouvement incrémental minimum (MIM). C'est le plus petit incrément de mouvement que le système est capable de réaliser de manière cohérente et détectable. [3]
- L'erreur de répétabilité est la déviation par rapport à la moyenne des positions réelles lorsque le système est commandé plusieurs fois pour se rendre à la position désirée.
- L'erreur de justesse est la différence entre la position réelle et la position souhaitée.

Ces caractéristiques sont communément fournies par l'ensemble des fabricants en se référant à des normes [4]. En fonction des

normes utilisées, le comparatif peut être délicat.

Après avoir vu les principaux éléments constitutifs d'un hexapode, nous allons maintenant évoquer ses avantages. Outre la souplesse d'utilisation des six degrés de liberté, la structure parallèle de l'hexapode présente une grande raideur, une masse relativement faible et une capacité de charge élevée grâce à sa répartition sur les six actionneurs. L'hexapode présente de très bonnes performances de positionnement de précision, notamment en rotation, et ces valeurs sont fiables dans le temps. Le plateau mobile est facile d'accès pour l'installation de la charge. L'hexapode peut disposer d'un large passage au centre souvent utilisé dans les applications photoniques. Le plateau mobile de l'hexapode est maintenu de façon isostatique, ce qui garantit un bon fonctionnement, quels que soient la

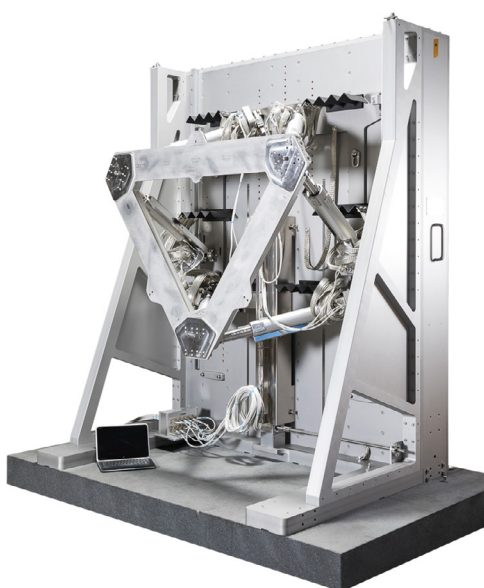


Figure 4. Hexapode compatible vide installé à l'horizontale sur une translation additionnelle - Crédits : Symétrie

Figure 5. Hexapode en salle blanche ISO5 intégré dans un banc de test optique - Crédits : Bertin Technologies





Figure 6. Hexapode intégrant une rotation additionnelle servant à vérifier la qualité des segments du miroir primaire M1 de l'ELT de l'ESO - Crédits : SAFRAN REOSC

charge, le centre de gravité ou même les déformations dues à la fixation d'un système sur le plateau. Pour des structures classiques en série qui sont hyperstatiques, la déformation structurale est toujours préjudiciable. L'hexapode présente des limites, notamment s'il y a besoin d'une très grande course sur un axe. Dans ce cas, il est parfois possible de combiner un hexapode avec une translation ou une rotation supplémentaire, tout en intégrant le contrôle du ou des axes supplémentaires dans le logiciel de façon ergonomique pour l'utilisateur.

Dans les paragraphes suivants, nous allons présenter quelques applications dans la photonique principalement, dans la recherche puis dans l'industrie. Les hexapodes sont fréquemment utilisés dans l'optique spatiale pour des opérations d'assemblage ou de qualification au sol où ils permettent des gains de temps considérables par rapport aux systèmes de positionnement plus traditionnels. Par exemple, les mouvements de très haute résolution de l'hexapode permettent d'illuminer chaque pixel d'un instrument optique l'un après l'autre et de vérifier leur bon ●●●

Dans l'astronomie, les hexapodes sont utilisés pour positionner le miroir secondaire des grands télescopes terrestres et compenser les déformations dues aux changements d'orientation ainsi que les variations de température tout au long de l'observation. Ils permettent aussi de calibrer des instruments ou de mesurer des miroirs lors de leur fabrication.



TRIOPTICS
FRANCE

UN UNIVERS DE PRÉCISION

- Solutions multiaxes pour applications exigeantes
- Utilisation en Micro et Nano-usinage laser, MEMS, semi-conducteurs, optique-photonique, Synchrotrons, métrologie, biosciences...
- Moteurs linéaires, servomoteurs, paliers à air. Contrôle et asservissements avancés
- Large gamme d'hexapodes et de tripodes haute précision



Micro et nano-usinage
laser XYR

Platine standard
XY - Répét. +30 nm

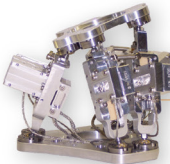




Tripodes et Hexapodes
hybrides* à moteurs linéaires

Montage de métrologie -
Platines LM-XYZ





Hexapode sous vide
et ultra-vide

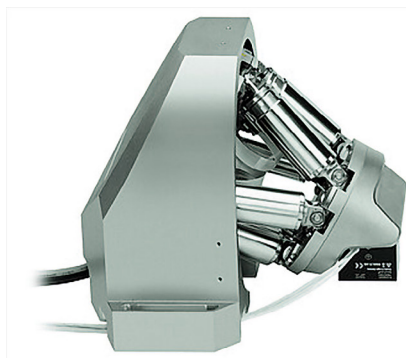
Portique à moteurs
linéaires



* Hybrid Hexapod® est un dispositif breveté et une marque déposée.

Trioptics France
 76 rue d'Alsace
 69100 Villeurbanne
 Tél. 07 72 44 02 03
 Fax : 04 72 44 05 06
www.trioptics.fr

Distributeur Officiel

fonctionnement. Les phénomènes de lumière parasite (*straylight*) sont aussi aisément caractérisés grâce aux mouvements angulaires fins apportés par l'hexapode.

Sur la figure 5, un hexapode positionne un ensemble optique comprenant notamment un corps noir et une source infrarouge. Ce système permet de calibrer et de qualifier les spectromètres infrarouges des satellites MTG-S du programme Meteosat Troisième Génération lors des phases de tests au sol. Les hexapodes spatialisés sont à ce jour peu nombreux, les segments du miroir primaire du télescope James Webb sont actionnés par des hexapodes réalisés par la société Ball Aerospace aux Etats-Unis. Sur l'observatoire spatial ATHENA de l'ESA dont le lancement est prévu pour 2031, un hexapode de grande taille alignera le miroir X de 2,5 mètres de diamètre en vol.

Dans l'astronomie, les hexapodes sont utilisés pour positionner le miroir secondaire des grands télescopes terrestres et compenser les déformations dues aux changements d'orientation ainsi que les variations de température tout au long de l'observation. Ils permettent aussi de calibrer des instruments ou de mesurer des miroirs lors de leur fabrication. Dans les grands instruments scientifiques de type synchrotrons ou lasers haute puissance, les hexapodes sont très appréciés car ils permettent de positionner un échantillon ou un miroir sur le faisceau



Figure 7. Hexapodes pour l'alignement de fibres optiques - Crédits : PI

de rayonnement synchrotron avec précision et stabilité.

À présent, nous allons exposer quelques applications dans l'industrie. Dans la photonique, l'application qui utilise probablement le plus d'hexapodes est l'alignement de fibres optiques. Dans le domaine des semiconducteurs, les hexapodes sont utilisés pour positionner divers composants mécaniques et optiques. Dans la défense, les hexapodes dynamiques, qui ont

une vitesse bien plus élevée mais une précision moindre que ceux présentés ci-dessus, peuvent simuler les mouvements d'un véhicule : un navire, un avion, une voiture... Il est ainsi possible de tester la qualité de stabilisation d'instruments électro-optiques qui seront ensuite embarqués sur des véhicules (terre, mer, air) avec des accélérations supérieures à 1 g.

Nous avons vu que l'architecture d'un hexapode est modulable et permet de s'adapter à une application donnée en fonction de la géométrie choisie et des technologies employées (moteurs, codeurs, articulations). De plus en plus présents dans tous les domaines, ils doivent maintenant répondre aux défis technologiques de l'ultra-précision avec des résolutions de quelques nanomètres et des stabilités de quelques nanoradians pour pouvoir tester les optiques de demain. Cela sera possible grâce à des efforts continus en R&D pour améliorer et inventer de nouvelles techniques et technologies sur les plans mécaniques, électroniques et métrologiques. ●

FOURNISSEUR	SITE WEB	DISTRIBUTION EN FRANCE
Symétrie	https://symetrie.fr/	Symétrie
Aerotech	https://www.aerotech.com/	Aerotech France Optoprim
Alio	https://alioindustries.com/	Trioptics
Newport	https://www.newport.com/	Micro-Contrôle Spectra-Physics
PI	https://www.physikinstrumente.com/	PI France
Smaract	https://www.smaract.com/	Smaract

RÉFÉRENCES

- [1] J.-P. Merlet, *Les Robots Parallèles*, Paris, Hermes Science Publishing (1997)
- [2] S. Henein, *Conception des guidages flexibles*, EPFL Press (2003)
- [3] A. Vissière, S. Krut, O. Company, T. Roux, P. Noiré, F. Pierrot, *Resolution evaluation of 6-degree-of-freedom precision positioning systems : Definitions and apparatus*, Elsevier / Measurement 152 (2020)
- [4] Norme ISO 230-2 : Méthodes de contrôle et d'évaluation de l'exactitude et de la répétabilité de positionnement des axes des machines