

1.4 Étude des systèmes pneumatiques

1.4.1 Motivation de la commande des systèmes pneumatiques

En général, l'actionneur⁵⁸ est utilisé comme un convertisseur d'énergie (électrique, pneumatique ou hydraulique) en force mécanique ou en effet cinétique (déplacement et vitesse). En particulier, les actionneurs pneumatiques⁵⁹ présentent certaines qualités inestimables qui peuvent être exploitées en robotique, en téléopération, et dans les milieux rigides [157]. Par contre, l'usage de ces dispositifs ne connaît pas autant de succès lorsqu'ils s'agissent des applications de grandes précisions ou des opérations très rapides; en raison des multiples difficultés liées à la physique (mécanique et thermodynamique) de ce type d'installation (dynamique fortement non linéaire, incertitude et couplage de force/position) [158, 159, 160]. En plus, le frottement est considéré comme un aspect omniprésent dans les actionneurs pneumatiques. La lubrification des différents points de contact piston-tige-charge-cylindre peut déjà affecter le niveau des pressions dans les chambres; contrairement aux dispositifs hydrauliques par exemple (dans lesquels le fluide joue un rôle important dans l'auto-lubrification des différents contacts mécaniques). Ainsi, pour accroître les possibilités de l'emploi des systèmes pneumatiques dans des applications plus exigeantes (en terme de précision et de rapidité), il faut améliorer les performances transitoires, les conditions de stabilité et la robustesse de ce type de servo-systèmes en force et en position. D'où, il est nécessaire de planifier des stratégies de commande de force (pression) et de position [161, 162, 163]. Nous avons étudié plusieurs travaux, dans la littérature, en rapport avec ce sujet particulier de contrôle des systèmes pneumatiques. Les performances des résultats présentés varient selon les classes de modèles et de commandes mises en jeu [164, 165, 166].

⁵⁸ Un dispositif mécanique, électrique, pneumatique ou hydraulique permettant d'agir sur une machine, un système, pour modifier son fonctionnement ou son état.

⁵⁹ Organe de puissance utilisant l'air comprimé comme source d'énergie (d'après www.granddictionneure.com).

1.4.2 Description des stratégies de commandes des systèmes pneumatiques

Dans cette section, nous passons en revue les principales classes de commandes appliquées aux servo-systèmes pneumatiques.

1.4.2.1 Commandes linéaires

Depuis le développement des premiers modèles mathématiques des systèmes pneumatiques [28, 167], nous pouvons déjà constater le caractère dynamique et non linéaire de ces systèmes [168, 169]. Mais, les premières techniques de commandes se basent sur le principe de linéarisation locale ou ponctuelle de ces systèmes autour du point de fonctionnement, pour utiliser des outils de commandes linéaires par *feed-back* [170, 171]. L'emploi de cette approche simpliste est répété dans plusieurs applications [172, 173, 174]. Elle est aussi combinée avec des techniques (de réglage et de modification) intuitives, pour améliorer la réponse; telles que :

- L'ajustement des gains du contrôleur linéaire (en particulier le gain intégrateur) [175], pour éliminer progressivement les cycles limites liés au broutement (effet d'oscillation dû au frottement). Or, l'erreur du système en régime permanent dépend manifestement de cette action d'ajustement.
- L'utilisation d'un *feed-back* d'accélération avec la commande PID, pour améliorer les conditions de stabilité du servo-système pneumatique [176].
- L'ajout de termes spécifiques, comme le retard, pour améliorer la robustesse vis-à-vis des signaux de bruit, en particulier, pendant les déplacements de la charge à vitesse réduite (force de frottement statique).

L'implémentation de ces modifications heuristiques reste une étape archaïque (basée sur le principe d'essai-erreur) [177].

1.4.2.2 Commandes linéarisantes

Plusieurs chercheurs ont utilisé cette technique dans la réalisation de la commande des systèmes pneumatiques, pour réduire leur complexité et annuler les non-linéarités fixes (ou parfaitement connues) [160, 178, 179]. En général, l'application de la commande linéarisante est conditionnée, au moins, par la connaissance complète du modèle mathématique du système. L'emploi de cette commande dans le cas des systèmes pneumatiques est donc contraint à certaines simplifications dans le modèle dynamique [160, 180]. Cette technique reste donc insuffisante. En effet, il faut tenir compte des incertitudes et des perturbations; dues aux variations des paramètres et aux dynamiques indéterminées du système [21, 170, 181]. Kimura *et al.* [178, 182] ont proposé une technique de linéarisation par *feed-back* avec une action de rejet de perturbation. La force de frottement peut être estimée par un observateur de frottement statique [108] ou dynamique [180, 183]. Dans [108], la dynamique d'erreur d'observation non linéaire reste localement asymptotiquement stable pourvu que la vitesse reste bornée [184]. L'autre problème à surveiller dans l'application de ce genre d'approche est la complexité du couplage force/position; qui ne peut pas être réduit aussi simplement (par hypothèse ou par le biais de la théorie des perturbations singulières comme c'est le cas avec les actionneurs électriques par exemple) [160, 176, 180]. En effet,

- la dynamique de pression est relativement lente (elle ne peut pas être négligée devant celle de la position);
- la perturbation causée par le mouvement de la partie mécanique n'est pas forcément bornée.

Dans des travaux plus récents, Xiang et Wikander [180, 183] ont proposé une méthodologie structurée, basée sur la théorie des blocs, pour représenter les multiples aspects des servo-systèmes pneumatiques. En particulier, ils ont implémenté le comportement de frottement utilisant le modèle de *LuGre* à paramètres fixes. Ces contributions ont considéré alors une modélisation dynamique de frottement qui ne tient pas compte de la variation de

ses paramètres [183]. La méthodologie de la commande proposée dans ces travaux a été basée sur le principe de la théorie quantitative de *feed-back*⁶⁰ [161]. Les performances de cette technique approchée dépendent de la précision des modèles des blocs et des résidus (ou erreurs) de linéarisation utilisées [161]. Ces résidus de linéarisations sont dus aux limitations des incertitudes du dispositif pneumatique de positionnement. Aussi, l'analyse de stabilité de l'ensemble des systèmes (dynamiques) inter-connectés reste difficile à établir dans ce cas [183].

1.4.2.3 Commandes adaptatives

Dans le même ordre d'idée, le développement de la technique de commande adaptative est assuré par le biais d'une réduction (ou approximation) de la dynamique du système [185, 186]. Le principe de cette transformation est de linéariser cette dynamique par rapport à un ensemble de paramètres (non-linéarités et incertitudes) variant dans le temps [187, 188, 189]. Le résultat de cette méthode dépend, en général, du niveau d'approximation appliquée.

1.4.2.4 Commandes robustes

La description scrupuleuse d'un système d'actionneur pneumatique assume, en général, un modèle non linéaire muni de deux types d'incertitudes [164, 190] :

- des incertitudes paramétriques (variations des états thermodynamiques, échanges thermiques, variation des conditions d'écoulement et caractéristiques dynamiques variables du frottement);
- des incertitudes non structurées ou, à la limite, sans modèle (réduction de l'ordre du système, simplification ou omission du modèle de frottement).

⁶⁰ En anglais, *quantitative feedback theory* (QFT).

Toutes ces caractéristiques font de la commande robuste le champ d'application le plus sollicité dans ce cas. En effet, plusieurs types de commandes robustes sont appliquées dans plusieurs travaux :

- commande linéaire à gains élevés [191, 192];
- contrôle de pression avec un observateur de bruit pour compenser l'influence des forces de frottement et des variations des paramètres [193, 194];
- commande rapide de *Bang Bang* [195];
- commande non linéaire, basée sur l'analyse de *Lyapunov* [196];
- commande VSC ou SMC [162, 163].

Notamment, la plupart de ces schémas de commandes usent dans des structures rapides (de hautes fréquences) à gains élevés (*i.e.* efforts excessivement élevés dans la valve). Or, les dispositifs pneumatiques sont typiquement caractérisés par des bandes passantes réduites qui limitent l'action des gains élevés [197]. En outre, les oscillations de hautes fréquences du signal de commande (*i.e.* vibrations du tiroir de la servo-valve) induisent [163, 190] :

- des problèmes de saturation; ce qui implique des signes de fatigue prématurée et de dysfonctionnement de la structure mécanique surtout dans la valve;
- des fluctuations de la pression;
- des erreurs de suivi en régime permanent.

1.4.2.5 Commandes 'sans modèle'

Une manière pour contourner majoritairement les difficultés, liées aux modèles de systèmes pneumatiques (non-linéarités et incertitudes), est de concevoir des lois de commandes qui ne nécessitent pas de connaissance du modèle explicite du système à contrôler; par exemple :

- la commande floue [198, 199],
- la commande par réseau de neurone [200].

Ce type de commande peut être aussi combiné partiellement avec les outils de commandes usuelles (commande linéaire, commande adaptative, *etc.*), pour contrebalancer certains effets non mesurables, comme le frottement [108, 201]. Néanmoins, les résultats de ce genre de méthodes n'aspirent pas à une grande amélioration de la qualité (vu l'absence totale ou partielle d'information sur le modèle du procédé); surtout dans le cas des applications de hautes précisions.

1.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude exhaustive sur les points suivants :

- la modélisation et les techniques de compensation de frottement;
- la commande des systèmes robotiques opérant sur des surfaces de contact sous frottement;
- la commande des systèmes d'actionneurs pneumatiques reconnus pour leur prépondérance du facteur frottement.

L'évaluation des différentes classes de commandes de ces systèmes est dédiée, dans l'ensemble, à un choix dominant, qui nous permet de justifier le principe de la commande que nous proposons dans le cadre de la présente thèse (voir dans les chapitres 2, 3, 4 et 5). L'objectif de notre choix répond essentiellement aux critères suivants : PRÉCISION, ROBUSTESSE et SIMPLICITÉ (le plus possible !) ..