

Augmenter la flexibilité des procédés de manipulation automatisés par l'utilisation de la structure reconfigurable PARAGRIP

T. MANNHEIM^a, S. KURTENBACH^b, K. BOUDOU^c, I. PRAUSE^d, M. HÜSING^e, B. CORVES^f

Department of Mechanism Theory and Dynamics of Machines, RWTH Aachen University,
e-mail: a Mannheim@igm.rwth-aachen.de, b Kurtenbach@igm.rwth-aachen.de; c Boudou@igm.rwth-aachen.de;
d Prause@igm.rwth-aachen.de; e Huesing@igm.rwth-aachen.de; f Corves@igm.rwth-aachen.de

Résumé :

Cet article traite de l'augmentation de la flexibilité et de la polyvalence d'un système automatique d'assemblage, mais aussi d'un système capable d'améliorer l'efficacité et de diminuer des coûts de ces systèmes. Une solution à ces problématiques est un système robotisé innovant appelé PARAGRIP (Préhension en parallèle). Ce système de manipulation a une architecture reconfigurable issue d'une conception modulaire et modifiable. Il est capable de manipuler des objets dans un espace cartésien à 6 dimensions à l'aide de plusieurs bras robotisés qui forment une structure cinématique en boucle fermé incluant l'objet manipulé comme une plate-forme mobile. Etant donné que les points de fixation et de préhension des bras, ainsi que de nombreux autres paramètres peuvent être aisément modifiés, le système de manipulation peut être reconfiguré à moindre coût afin de satisfaire les demandes et les besoins de l'utilisateur. La reprise dynamique de l'objet par des bras supplémentaires autorise l'ajustement cinématique, et ce même au cours d'un mouvement. Cet article présente les différents types de reconfigurations essentiels ainsi que leurs combinaisons optimales. Plusieurs exemples de cas concrets illustrent l'amélioration des performances du système de manipulation reconfigurable.

Mots clefs : système de manipulation reconfigurable, flexible et variable, auto-optimisation,

1 Introduction

Depuis quelques années, l'industrie de production est animée par des changements majeurs, tant en termes de mondialisation progressive et de développement technologique rapide, qu'en termes d'évolution des ressources [1,9]. Les exigences standards relatives aux systèmes de manipulation sont actuellement en plein changement et portaient, par le passé, sur l'amélioration des capacités de charge, de la précision et des vitesses de fonctionnement. Cependant, favoriser la mise en place de productions adaptables et de solutions flexibles aptes à répondre au problème de diversité des composants devient primordial. Les systèmes de manipulation disponibles sur le marché ne sont pas en mesure de répondre à ces exigences croissantes et n'autorisent pas des travaux d'assemblage pour des petites séries de systèmes de grande envergure tels que les avions, les bateaux, les éoliennes et les panneaux solaires.

Un seul robot doté d'un préhenseur adapté au produit manipulé ne permet généralement pas de déplacer un objet de grande taille, car soit les dimensions du préhenseur deviennent trop grandes, soit l'objet est soumis à de fortes forces de manipulation. Le concept de manipulation avec des robots coopérants apporte une approche plus polyvalente car l'objet peut être saisi et maintenu en différents points par plusieurs robots dépendant de sa forme [3]. Un inconvénient découlant du nombre important de robots industriels qui manipulent la même pièce est le nombre élevé d'actionneurs nécessaires. Il est, par exemple, nécessaire d'avoir 18 actionneurs répartis sur trois robots pour manipuler un objet selon les 6 degrés de liberté (ddl). Les actionneurs supplémentaires créent un système avec une forte redondance. Ceci amène une architecture de contrôle complexe ainsi que des coûts élevés. Par ailleurs, les robots industriels n'étant pas conçus pour être mobiles, les réarranger dans une configuration différente implique de longs temps de préparation car ils doivent être calibrés avec soin. Actuellement, aucun logiciel de conception de systèmes robotisés reconfigurables n'est

disponible sur le marché. Pour cette raison, trouver une configuration individuelle et adaptée à chaque tâche est difficile. De plus, les solutions de robots industriels existants ont des performances limitées et sont très onéreuses pour des tâches de manipulation variables dans le secteur de l'automatisation.

Dans la littérature, des nombreuses recherches sont discutées et les méthodes de reconfiguration de robots sont un des points clé. On y trouve un large aperçu de concepts et de réalisations de robots modulaires qui peuvent être réassemblés, ajustés et modifiés en fonction de leur environnement [4].

Au sein de nombreux projets, la recherche d'une approche universelle est l'objectif principal. Les robots reconfigurables possèdent de nombreuses unités identiques, conçues pour être réassemblées dans des configurations différentes [5, 6] et pour interagir comme un groupe. La quasi-totalité de ces robots n'est utilisée que dans le secteur de la recherche et la plupart d'entre eux sont développés pour des tâches de déplacement sur terrains inconnus. Les auteurs ne disposent d'aucune information sur une quelconque application, où des systèmes de robots reconfigurables sont utilisés pour des tâches de préhension au sein de processus d'assemblage.

Avec le but de mettre l'accent sur la flexibilité et la polyvalence dans les tâches de manipulation d'objets, un nouveau système reconfigurable est développé et présenté dans [7-9]. La Figure 1 montre une esquisse du système "PARAGRIP" qui manipule des composants volumineux via plusieurs bras mobiles.

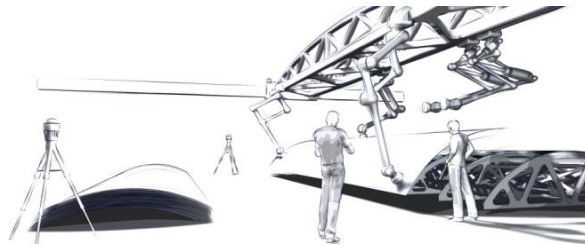


Figure 1: Design du concept de manipulation adaptable et reconfigurable PARAGRIP

Le système offre les mêmes performances de manipulation que des robots coopérants, mais avec une plus grande polyvalence et flexibilité, à moindre coûts. Il est basé sur un concept d'actionnement à configuration différente composé d'actionneurs moins nombreux et plus simples. En raison de cette architecture, les bras séparés les uns des autres sont sous-actionnés et travaillent en collaboration. C'est pourquoi, une conception des bras, légère et mobile, est possible. En combinant les bras en une chaîne cinématique fermée, le robot entier gagne en rigidité, en précision et en capacité de charge nécessaire pour manipuler des objets.

Cet article traite de la possibilité de définir les grandeurs cinématiques d'un système de robots modifiables, dans le but de s'adapter à l'espace de travail et aux performances exigées pour la réalisation de tâches spécifiques. Tout d'abord, nous présenterons le nouveau concept de préhension ainsi que la structure du robot. Ensuite, nous développerons les types de reconfiguration et donnerons un bref aperçu d'un outil de conception pour les gérer. Enfin, nous illustrerons notre réflexion par quelques exemples concrets afin de démontrer l'amélioration des performances du système de manipulation modifiable PARAGRIP.

2 Concept de manipulation

L'idée principale de ce nouveau concept de manipulation est basée sur la préhension et la manipulation d'objets à l'aide de bras multiples, au sein d'une structure cinématique parallèle (voir figure 2) pour augmenter la flexibilité et l'automatisation des processus d'assemblage, en petites séries, des composants de grandes tailles [9]. Chaque fois que la préhension est assurée, la structure cinématique parallèle est reconstituée et intègre alors l'objet à l'intérieur de la structure du robot en tant que plateforme mobile. Contrairement aux systèmes de manipulation mécaniques anthropomorphes [10-14], l'objet n'est pas serré ou fixé pour rendre une manipulation possible. L'élément de contact à l'extrémité de chaque bras fournit une connexion stable temporaire qui peut transmettre des forces et des moments dans toutes les directions. Le mécanisme en boucle fermée résultant est formé par les bras et l'objet.

Le déroulement d'une manipulation complète est divisé en trois phases: la préhension, la manipulation et le décollage (voir figure 2). Au cours des phases de serrage et de desserrage, chaque bras nécessite au moins 3 ddl. En phase de manipulation seulement 2 ddl actionnés pour chaque bras sont nécessaires. Au cours de la phase de manipulation, l'objet devient partie intégrante du robot, lorsque les zones de contact des préhenseurs sont positionnées sur l'objet par les bras séparés. Les forces d'adhérence sont générées par des électro-aimants, ventouses, etc., pour assurer que les chaînes cinématiques restent fermées. Cette structure cinématique est similaire à une structure de robot parallèle. Contrairement aux robots coopérants, la configuration de l'architecture pour chaque position de l'objet est déterminée par seulement six actionneurs.

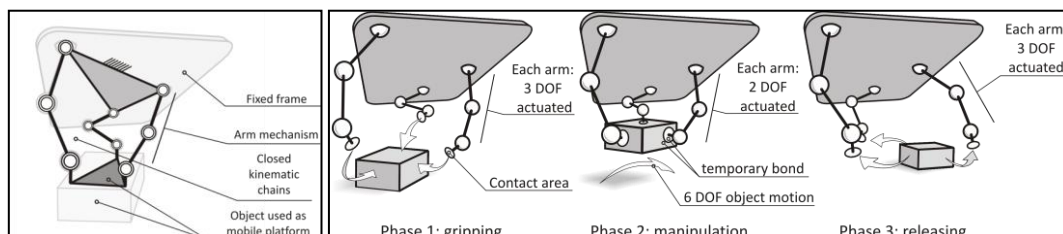


Figure 2: Nouveau principe de manipulation et déroulement d'une manipulation d'objet

3 Architecture du robot

Pour effectuer un mouvement à 6 ddl sur l'objet à l'aide du système de préhension décrit, chaque bras doit avoir 6 ddl, quel que soit le nombre de bras en contact avec l'objet. Une configuration favorable est alors composée de trois bras, de six actionneurs principaux et de trois autres actionneurs plus petits pour la préhension. Pendant la phase de manipulation, des actionneurs supplémentaires peuvent être déconnectés, entraînés passivement ou supporter activement le mouvement de l'objet. Comme représenté sur la figure 4, chaque mécanisme de bras est la combinaison d'une liaison à cinq barres avec une structure de parallélogramme, d'une liaison pivot selon l'axe vertical et d'un poignet rotulé, similaire à la structure présentée dans [15]. La synthèse et l'analyse de la cinématique et de la dynamique de ce robot sont discutées dans [16]. La figure 3 montre une photo du prototype réalisé en cours de manipulation d'un objet avec une configuration à trois bras.

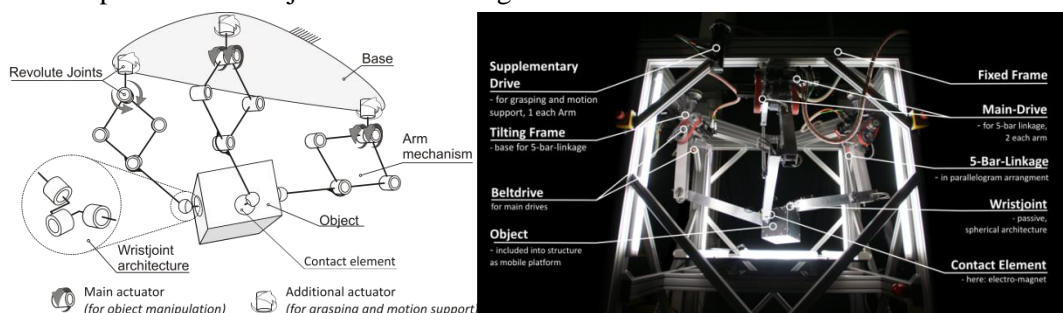


Figure 3: Schéma de l'architecture du robot et photo du prototype dans une configuration à trois bras

4 Reconfiguration

En comparaison des mécanismes mettant en valeur seulement 1 ddl, un robot est capable d'effectuer des tâches de manipulation sans modification mécanique. Selon la conception du préhenseur, des objets de formes et de tailles différentes peuvent être manipulés avec ou sans remplacement de celui-ci. Si les changements des limites de manipulation sont trop grands, l'automatisation de la tâche devient techniquement impossible. Pour atteindre une certaine flexibilité, une reconfiguration rapide et facile du système de manipulation est nécessaire. Dans le cas du concept de manipulation présenté, la configuration du système peut être adaptée en changeant les paramètres et les modules (voir figure 4).

Par ce « système de robots modulaire », trois possibilités fondamentales sont données pour adapter la configuration à une certaine tâche. La première concerne la variation de certains paramètres

cinématiques, comme les longueurs des liaisons dans un bras robotisé ainsi que les positions des contacts avec la plate-forme mobile, ou de la base fixe de tous les bras réunis. Ces changements ont un fort impact sur l'espace de travail et sur la performance globale du système robotisé. Ils influencent des paramètres tels que la capacité de torsion et de vitesse, la rigidité et la précision.

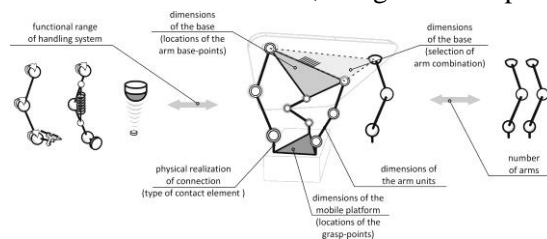


Figure 4: Paramètres et modules pour la configuration

La deuxième possibilité est d'augmenter la flexibilité en mettant à l'échelle le système. En ce sens, cela ne signifie pas une « variation de taille », mais plutôt une « variation de quantité » des unités. En enlevant et en ajoutant des bras supplémentaires, un large éventail d'objets de tailles et de poids différents peut être manipulé. La redondance cinématique ou la génération de mouvement améliore la rigidité et la charge utile et permet de supporter des objets grands et fragiles en de nombreux points.

La troisième possibilité d'influer sur les capacités du robot est varier les modules avec des fonctions différentes. L'intégration des unités de mesures, de fabrication, de liaison ou d'équilibrage augmente la fonctionnalité globale. En combinant ces trois aspects, un concept de « système de robots modulaire » peut être conçu, comme illustré sur figure 5.

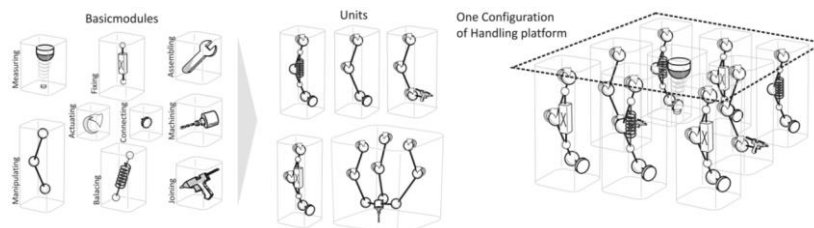


Figure 5: Vue schématique d'un « système de robots modulaire »

Tous ces paramètres de configuration ont une influence différente sur la performance, la fonctionnalité et la capacité du robot. Cet article se concentre sur une structure cinématique modifiable, mentionnée ci-dessus comme étant par la première possibilité de configuration. Cela veut dire que dans les cas suivants, les grandeurs cinématiques d'un bras seul sont supposées être fixes et « seulement » les points de préhension sur l'objet, les points de base des bras et la sélection de la combinaison des bras qui guident l'objet sont variables et doivent être déterminés. En modifiant ces paramètres cinématiques, les dimensions de la plate-forme fixe et mobile sont réglables, comme illustré figure 6.

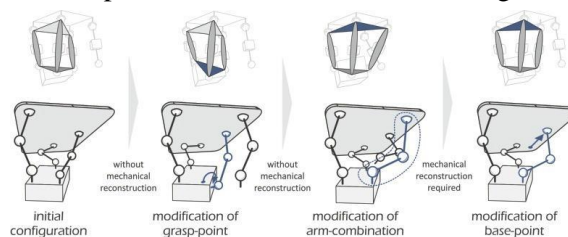


Figure 6: Modification de la plate-forme fixe et mobile

L'objet est intégré dans la structure cinématique et devient la plate-forme mobile du manipulateur parallèle. Par conséquent, la modification des points de préhension implique une modification des grandeurs cinématiques de cette plate-forme. Comme les capacités des robots parallèles sont influencées fortement par ces grandeurs et que saisir l'objet est nécessaire avant chaque mouvement, la sélection judicieuse des points de préhension apparaît comme étant le paramètre de configuration le plus important de ce système. La sélection des points d'ancrage appropriés des bras à la base est aussi d'une grande importance. Ces points peuvent être modifiés en déplaçant les bras mobiles vers un autre emplacement ou en sélectionnant une combinaison de plus de trois bras. Les positions des points d'ancrage du groupe sélectionné définissent principalement l'espace de travail en translation du robot.

Ici, l'espace de travail d'orientation constant est présenté pour un robot ayant trois différentes combinaisons de point d'ancrage de la base, manipulant un objet mince tel qu'une plaque.

5 Exemples de reconfiguration

Dans ce chapitre, trois cas de mouvements réalistes sont présentés. Pour chaque cas, le critère d'espace de travail est analysé en examinant les angles des articulations actionnées et libres, ainsi que les restrictions de collision. Par souci de clarté, les critères de performance cinétostatique ne sont pas considérés ici, mais en général, ils doivent être évalués afin de trouver une configuration optimale pour le robot. Le premier cas représente un simple mouvement linéaire de translation d'un objet cubique selon la direction x_p , combiné à une rotation de 90° autour de l'axe orthogonal y_p (voir figure 7).

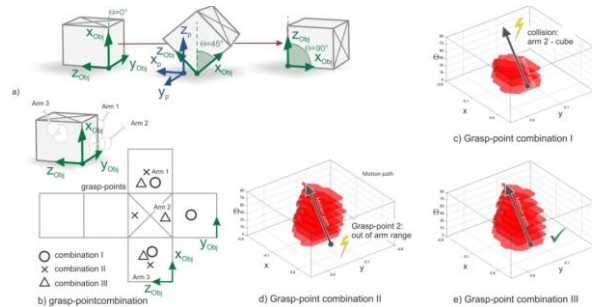


Figure 7: Cas de mouvement avec variation des points de préhension

Les espaces de travail selon les dimensions X_p , Y_p , θ pour les trois combinaisons de points de préhension sont illustrés par les sous-figures c-e. La combinaison (I) de points de préhension permet de prendre le cube, mais provoque une collision à la fin du mouvement. Ceci peut être vu dans la figure 7c, lorsque la trajectoire de mouvement, illustrée par la ligne noire épaisse, sort des tranches de l'espace de travail. Dans toutes les sous-figures c-e, l'espace de travail est représenté selon les directions de translation x_p et y_p ainsi que selon la rotation de l'espace de travail autour de l'axe y_p . La tentative de préhension, combinaison (II), entraîne une erreur directement au début du mouvement parce que les points du bras 2 ne sont pas à l'intérieur de l'espace de travail requis. Par un algorithme de conception automatique, une solution (III) peut être trouvée qui offre un espace de travail approprié pour effectuer le mouvement sans collision.

Dans le cas suivant, un objet de la forme d'une plaque doit être déplacé le long d'une trajectoire donnée suivant une orientation constante. La configuration du présent robot est faite de quatre bras situés sur la base et les positions de préhension sont données et non variables. La figure 8a montre les espaces de travail planaires XY simplifiés, pour les quatre combinaisons de bras en couleurs

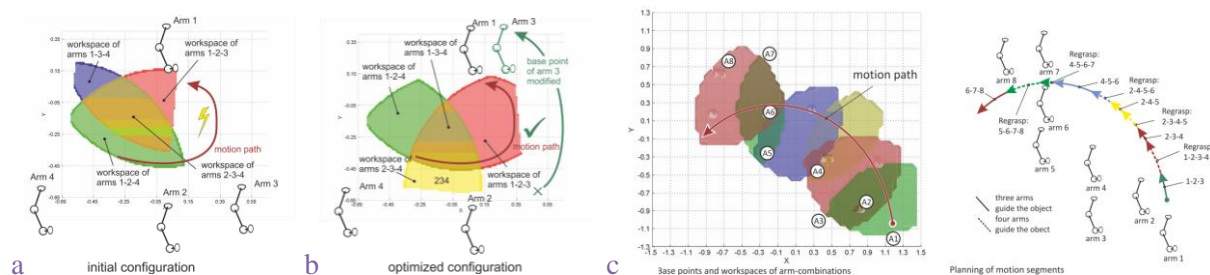


Figure 8: Cas de mouvement avec variation des points d'ancrage

différentes ainsi que la trajectoire de mouvement requise en une même illustration. L'espace de travail de la combinaison de bras 2-3-4 n'est pas visible, car elle se situe exactement dans la zone d'intersection des trois autres. On peut voir qu'aucune de ces combinaisons n'est capable d'assurer le mouvement du début à la fin. De plus, un segment de la trajectoire est inaccessible pour toutes les combinaisons à trois bras. Cela implique que même le fait de ressaisir l'objet ne réussira pas. Un réarrangement du bras 3 est la solution (figure 8b). Ici, les quatre espaces de travail en translation sont également affichés. La combinaison des bras 1, 2 et 3 permet d'accomplir la tâche. Dans le dernier cas, un mouvement plus complexe devrait être effectué. Par souci de clarté dans l'illustration des espaces

de travail, ici l'orientation de l'objet pendant le mouvement reste constante. Il faut souligner que même les grandes rotations de 360° ou plus, selon n'importe quel axe auxiliaire, sont possibles, mais difficiles à représenter. La figure 8c montre une configuration de robot à huit bras. Trouver des combinaisons appropriées pour trois bras, mène à un grand espace de travail combiné, qui couvre toute la trajectoire. Ce mouvement peut être effectué par une reprise de l'objet, ce qui signifie changer la combinaison des bras dans les zones, où les espaces de travail individuels se chevauchent. Ici, à la reprise, un seul bras est modifié à la fois. Remplacer directement deux ou même l'ensemble des trois bras est ainsi parfois possible s'il y a un nombre et des positions de bras appropriés.

6 Conclusion

Cet article traite de l'augmentation de la flexibilité et de la polyvalence d'un système de manipulation, mais aussi de l'impact d'une structure reconfigurable sur l'efficacité et l'optimisation des coûts de ces systèmes. Une solution pourrait être donnée par un nouveau système de robots intitulé PARAGRIP, disposant d'une architecture reconfigurable, de conception modulaire et modifiable. Comme plusieurs paramètres cinématiques peuvent être facilement changés, le robot peut être reconfiguré à faibles coûts, en fonction des préférences de l'utilisateur et de ses besoins. Dans cet article, la question s'est posée de savoir, quels sont les différents types de reconfiguration essentiels et comment ils peuvent être combinés de façon optimale à l'aide d'un outil de conception de configurations automatique. Plusieurs exemples concrets ont souligné l'amélioration des performances d'un système de manipulation, qui peut être adapté à la variation des conditions aux limites.

7 Remerciements

Ce travail ayant été développé selon la vision du cluster d'excellence « technologie de production intégrée pour les pays à hauts revenus (EXC 128) », les auteurs tiennent à remercier la Fondation Allemande de Recherche (DFG) pour son soutien. Ce projet fait partie de la sous-catégorie « CIM D-3.2: Systèmes d'assemblage flexibles pour l'automatisation auto-adaptative » et est réalisé en collaboration avec le Laboratoire de Machines-Outils et des Techniques de Production à l'université RWTH Aachen.

References

- [1] Möller N., 2008; „Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme“; Forschungsbericht IWB, Band 212.
- [2] Nyhuis P., 2008; „Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten“ Garbsen, PZH, PT. Zentrum.
- [3] Feldmann K.; Ziegler C.; Michl M., 2007; „Bewegungssteuerung für kooperierende Industrieroboter in der Montageautomatisierung“ In: wt werkstattstechnik online.Jg.97, , Nr. 9, S. 713.
- [4] Yin, M., Chen, W.-M., Salemi, B., Rus, D., Moll, M., LIPSON, H., et al. (2007). Modular Self-Reconfigurable Robot Systems - Challenges and Opportunities for the Future. IEEE Robotics & Automation Magazine , S. 42-53.
- [5] Jorgensen, M.W.; Ostergaard, E.H.; Lund, H.H.; , "Modular ATRON: modules for a self-reconfigurable robot," Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on, pp. 2068- 2073 vol.2, 28 Sept.-2 Oct. 2004.
- [6] Zykov, V.; Mytilinaios, E.; Desnoyer, M.; Lipson, H.; "Evolved and Designed Self-Reproducing Modular Robotics," Robotics, IEEE Transactions on , vol.23, no.2, pp.308-319, April 2007.
- [7] Nefzi M., Riedel M., Corves. B., 2006. "Development and design of a multi-fingered gripper for dexterous manipulation". Mechatronic Systems, 4(1).
- [8] Riedel M., Nefzi M., Hüsing. M., Corves. B., 2008. "An adjustable gripper as a reconfigurable robot with a parallel structure". In Proceedings of the Second International Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators.
- [9] Müller, R.; Riedel, M.; Vette, M.; Corves, B.; Esser, M.; Hüsing, M., 2010 „Reconfigurable Self-Optimising Handling System“, Precision Assembly Technologies and Systems, Hrsg.: Ratchev, S.5th International Precision Assembly Seminar, IPAS 2010 , 1. Aufl. , Springer Berlin, ISBN 978-3-642-11597-4, pp. 255-262.
- [10] Bicchi, A. ,2000. "Hands for dexterous manipulation and powerful grasping: A difficult road toward simplicity". IEEE. Trans. Robot. Automat., vol. 16, pp. 652-662.
- [11] Bicchi, A. (1995). "On the Closure Properties of Robotic Grasping". The Int. Journal of Robotics Research, vol. 14, pp.319-334.
- [12] Butterfass, J., M., Grebenstein, H., Liu and G., Hirzinger 2001, "DLR II: Next generation of a dexterous robot hand". In: Proc. IEEE Int. Conf.on Robotics and Automation, pp.109-120.
- [13] Lee, J.-J. and L.-W., Tsai, 2002. "Structural Synthesis of Multi-Fingered Hands". Journal of Mechanical Design, vol. 124, pp.272-276.
- [14] Yoshikawa, T. and K., Nagai (1991). "Manipulating and Grasping forces in Manipulation by Multifingered Robot Hands". Int. J. Robotics and Automation, vol. 7, pp.66-67.
- [15] Ebert-Uphoff I., Gosselin, C. M. 1998. „Kinematic Study of a new Type of special parallel Platform Mechanism“. DECT98/MECH-5962, Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conference.
- [16] Riedel, M.; Nefzi, M.; Corves, B.: "Performance Analysis and Dimensional Synthesis of a Six DOF Reconfigurable Parallel Manipulator". In: Proceedings of the IFToMM Symposium on Mechanism Design for Robotics. Mexico City, Mexico, September 28-30, 2010.