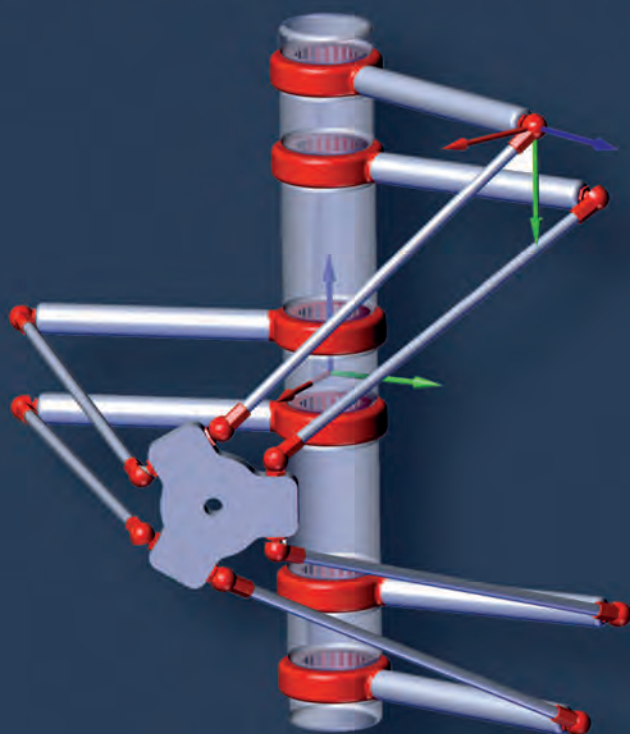


PAWEŁ ŁASKI

**ANALIZA
KINEMATYCZNA
ROBOTÓW
RÓWNOLEGŁYCH**



Politechnika Świętokrzyska

Kielce 2019

MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY

M121

PAWEŁ ŁASKI

***ANALIZA
KINEMATYCZNA
ROBOTÓW
RÓWNOLEGLYCH***

Kielce 2019

MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY NR M121

Redaktor Naukowy serii

INŻYNIERIA MECHANICZNA

prof. dr hab. inż. Tomasz Lech STAŃCZYK

Recenzenci

dr hab. inż. Kazimierz PESZYŃSKI, prof. UPT w Bydgoszczy

dr hab. inż. Zbigniew KULEZA, prof. PB

Redakcja

Irena IMIOŁEK

Projekt okładki

Paweł ŁASKI

Tadeusz UBERMAN

© Copyright by Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2019

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część tej pracy nie może być powielana czy rozpowszechniana w jakiegokolwiek formie, w jakiegokolwiek sposób: elektroniczny bądź mechaniczny, włącznie z fotokopiowaniem, nagrywaniem na taśmy lub przy użyciu innych systemów, bez pisemnej zgody wydawcy.

PL ISSN 1897-2691

PL ISBN 978-83-65719-65-2

Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej

25-314 Kielce, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7

tel./fax 41 34 24 581

e-mail: wydawca@tu.kielce.pl

www.wydawnictwo.tu.kielce.pl

Spis treści

Zestawienie ważniejszych oznaczeń	5
1. WPROWADZENIE	7
1.1. Struktury kinematyczne robotów	7
1.2. Podstawowe definicje	7
1.3. Porównanie struktur kinematycznych manipulatorów	11
1.4. Rodzaje par kinematycznych	12
2. ANALIZA KINEMATYCZNA	14
2.1. Ruchliwość manipulatorów	14
2.2. Zadanie proste kinematyki	16
2.3. Zadanie odwrotne kinematyki	16
2.4. Przestrzeń robocza	17
2.5. Ruchy sztywne i przekształcenia jednorodne	17
2.5.1. Przekształcenia jednorodne	18
2.5.2. Obroty (rotacje)	19
2.5.3. Przemieszczenia (translacje)	24
2.5.4. Przykład algorytmu Denavita-Hartenberga	28
3. MANIPULATORY PŁASZCZYZNOWE	31
3.1. Płaszczyznowe manipulatory równoległe	31
3.2. Manipulator płaszczyznowy o dwóch stopniach swobody z napędem obrotowym	31
3.3. Manipulator płaszczyznowy o dwóch stopniach swobody z równoległymi zorientowanymi napędami liniowymi	46
3.4. Manipulator płaszczyznowy o dwóch stopniach swobody z prostopadłymi napędami liniowymi	50
3.5. Manipulator płaszczyznowy o dwóch stopniach swobody z trzema napędami obrotowymi	53
3.6. Manipulator płaszczyznowy o dwóch stopniach swobody z trzema napędami liniowymi	56
3.7. Manipulator płaszczyznowy o trzech stopniach swobody z trzema napędami liniowymi	59
3.8. Manipulator płaszczyznowy o trzech stopniach swobody z trzema napędami obrotowymi	71

4. ROBOTY PRZESTRZENNE RÓWNOLEGŁE 3-DoF	76
4.1. Przestrzenne roboty równoległe 3-DoF	76
4.2. Manipulator przestrzenny o trzech stopniach swobody typu delta z napędem obrotowym	76
4.3. Manipulator przestrzenny o trzech stopniach swobody z pionowo zorientowanym napędem liniowym	89
4.4. Manipulator przestrzenny o trzech stopniach swobody z napędem liniowym tworzącym ostrosłup	93
4.5. Manipulator przestrzenny o trzech stopniach swobody z równoległymi napędami liniowymi	98
4.6. Manipulator przestrzenny o trzech stopniach swobody typu tripod z napędem liniowym	103
5. ROBOTY I MANIPULATORY PRZESTRZENNE RÓWNOLEGŁE 6-DoF	109
5.1. Orientacja platformy roboczej	109
5.2. Platforma Gough'a – mechanizm o sześciu stopniach swobody	110
5.3. Platforma Stewarta – mechanizm o sześciu stopniach swobody	128
5.4. Manipulator przestrzenny o sześciu stopniach swobody typu delta z napędem obrotowym	143
5.5. Manipulator przestrzenny o sześciu stopniach swobody z napędem obrotowym	154
5.6. Manipulator przestrzenny o sześciu stopniach swobody typu delta z napędem liniowym	163
5.7. Mechanizm przestrzenny o sześciu stopniach swobody z liniowymi napędami zorientowanymi skośnie do podstawy	172
5.8. Mechanizm o sześciu stopniach swobody z liniowymi napędami rozmieszczonymi na planie trójkąta i równoległymi do podstawy	184
5.9. Mechanizm o sześciu stopniach swobody z liniowymi napędami rozmieszczonymi na bokach trójkąta równobocznego	193
5.10. Mechanizm o sześciu stopniach swobody z równoległymi napędami liniowymi	204
5.11. Mechanizm o sześciu stopniach swobody z napędami liniowymi w układzie V6	214
6. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE	223
Literatura	224
Streszczenie	227
Summary	227

Literatura

- [1] Pierrot F., *Robots pleinement parallèles légers: conception, modélisation et commande*, 1991, <http://www.theses.fr/1991MON20060>.
- [2] Grübler M., *Eine Theorie des Zwanglaufes und der ebenen Mechanismen*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1917, doi: 10.1007/978-3-662-32953-5.
- [3] Skołuba J., *Projekt płaszczyznowego manipulatora o zamkniętym łańcuchu kinematycznym z mięśniowym napędem pneumatycznym*, praca dyplomowa magisterska, Kielce 2013.
- [4] Janus U., *Projekt płaszczyznowego manipulatora o zamkniętym łańcuchu kinematycznym z siłownikowym napędem pneumatycznym*, praca dyplomowa magisterska, Kielce 2012.
- [5] Shang W., Cong S., *Robust nonlinear control of a planar 2-DOF parallel manipulator with redundant actuation*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 30 (2014), pp. 597-604, doi:10.1016/j.rcim.2014.04.004.
- [6] Raatz A., *Stoffschlüssige Gelenke aus pseudo-elastischen Formgedächtnislegierungen in Pararellrobotern*, Vulkan-Verlag, 2006, https://books.google.pl/books?id=HTMZRe6_jlsC.
- [7] Dash A.K., Chen I.-M., Yeo S.H., Yang G., *Task-oriented configuration design for reconfigurable parallel manipulator systems*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 18 (2005), pp. 615-634, doi: 10.1080/09511920500069192.
- [8] Clavel R., *Device for the movement and positioning of an element in space*, U.S. 4976582A, 1985.
- [9] Bell C., *3D Printing with Delta Printers*, Apress, Berkeley, CA, 2015, doi: 10.1007/978-1-4842-1173-1.
- [10] Laski P.A., Takosoglu J.E., Blasiak S., *Design of a 3-DOF tripod electro-pneumatic parallel manipulator*, Robotics and Autonomous Systems, 72 (2015), pp. 59-70, doi: 10.1016/j.robot.2015.04.009.
- [11] Yiu Y.K., Li Z.X., *Dynamics of a Planar 2-dof Redundant Parallel Robot*, International Conference on Mechatronics Technology, 6-8 June 2001, Singapore, pp. 339-344 (2018).
- [12] Gough V.E., Whitehall S.G., *Universal tyre test machine*, Eley G. (Ed.), FISITA. International Automobile Technical Congress. Ninth. Proceedings, Institution of Mechanical Engineers, 1962, pp. 117-137 (1962).

- [13] Stewart D., *A Platform with Six Degrees of Freedom*, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 38 (1966), pp. 30-35, doi: 10.1108/eb034141.
- [14] Uchiyama M., Sadotomo T., Masukawa K., *Dynamic Control Experiment on a Parallel Robot HEXA*, Journal of the Robotics Society of Japan, 14 (1996), pp. 297-304, doi: 10.7210/jrsj.14.297.
- [15] Isaksson M., Brogårdh T., Watson M., Nahavandi S., Crothers P., *The Octahedral Hexarot – A novel 6-DOF parallel manipulator*, Mechanism and Machine Theory, 55 (2012), pp. 91-102, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2012.05.003.
- [16] Ros J., Yoldi R., Plaza A., Iriarte X., *Real-Time Hardware-in-the-Loop Simulation of a Hexaglide Type Parallel Manipulator on a Real Machine Controller*, [in:] Viadero F., Ceccarelli M. (Eds.), *New Trends in Mechanism and Machine Science*, Springer Netherlands, Dordrecht, 2013, pp. 587-597.
- [17] Huynh P., Arai T., Koyachi N., Sendai T., *Optimal velocity based control of a parallel manipulator with fixed linear actuators*, [in:] *Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems. Innovative Robotics for Real-World Applications. IROS '97*, IEEE, n.d.: pp. 1125-1130, doi: 10.1109/IROS.1997.655150.
- [18] Arruga S., Pozo F., Zapateiro M.F., *Hexapod platform positioning control*, [in:] *Seminar for Advanced Industrial Control Applications*, 2011, pp. 7-12, <http://hdl.handle.net/2117/14027>.
- [19] Hebsacker M., *Entwurf und Bewertung Paralleler Werkzeugmaschinen – das Hexaglide*, ETH Zürich, 2000, doi: 10.3929/ethz-a-003871683.

ANALIZA KINEMATYCZNA ROBOTÓW RÓWNOLEGŁYCH

STRESZCZENIE

W opracowaniu przeprowadzono analizę kinematyczną najczęściej spotykanych struktur robotów i manipulatorów o zamkniętych łańcuchach kinematycznych. Wskazano główne różnice pomiędzy robotami o kinematyce równoległej a konstrukcjami o kinematyce szeregowej. Wprowadzono podstawowe definicje elementów składowych rozpatrywanych struktur i na przykładzie robota o zamkniętym łańcuchu kinematycznym określono ruchliwość i ilość stopni swobody konstrukcji. Wprowadzono zapis macierzowy przekształceń jednorodnych w celu opisu ruchu członów sztywnych z uwzględnieniem łączących je przegubów. Największą część pracy stanowi analiza kinematyczna kilkunastu najbardziej rozpowszechnionych struktur o zamkniętych łańcuchach kinematycznych. W rozpatrywanych konstrukcjach utrudnione jest intuicyjne określenie kształtu przestrzeni roboczej, zatem wyznaczono ich kształty przy wprowadzeniu ograniczeń geometrycznych pracy napędów i łączących je przegubów.

KINEMATIC ANALYSIS OF PARALLEL ROBOTS

SUMMARY

The study carried out a kinematic analysis of the most common structures of robots and manipulators with closed kinematic chains. The main differences between robots with parallel kinematics and serial kinematics were pointed out. Basic definitions of the components of the considered structures were introduced on the example of a robot with a closed kinematic chain, the mobility and the number of degrees of freedom of the structure were determined. A matrix record of homogeneous transformations was introduced in order to describe the motion of rigid members, including the joints connecting them. The largest part of the work is a kinematic analysis of a dozen or so most widespread structures with closed kinematic chains. In the constructions under consideration, it is difficult to intuitively determine the shape of the workspace, so their shapes were determined while introducing geometrical limitations of the work of the drives and the joints connecting them.