

# 一种 Mecanum 三轮全向移动平台的设计与运动分析

高朋飞<sup>1</sup>, 彭江涛<sup>2</sup>, 于薇薇<sup>1</sup>, 李树军<sup>1</sup>, 秦现生<sup>1</sup>

(1.西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072;  
2.中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610000)

**摘要:**为提高常规 Mecanum 轮全向移动平台的装配简易性以及灵活性,设计一种对称向心布局结构的 Mecanum 三轮全向移动平台。通过分析 Mecanum 轮的结构特性和建立 Mecanum 三轮全向移动平台的运动学模型,给出 Mecanum 三轮全向移动平台在二维平面上实现全向移动的方法。并对三轮对称向心布局的 Mecanum 轮全向移动平台和常规四轮对称布局的 Mecanum 轮全向移动平台进行了运动仿真对比,分析表明 Mecanum 三轮对称向心布局的全向移动平台具有装配简易、驱动性能更好、灵活性更强、集群效果更好的性能,具有工业物流应用的潜力。

**关键词:**Mecanum 轮;三轮对称向心布局结构;运动仿真

中图分类号:TP242

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2017)05-0857-06

Mecanum 轮是瑞典麦克纳姆公司在 1975 年的专利,Mecanum 轮缘由若干可自由转动的辊子组成,辊子轴线与轮毂轮轴有一定的夹角,称为辊子的偏执角,通常情况下考虑到速度及受力的均衡性,工业上常用 Mecanum 轮的辊子偏执角取  $45^\circ$ ,而 Mecanum 轮具有的全向性以及良好的承重能力等特点,已使其广泛应用于工业生产当中<sup>[1-5]</sup>。基于 Mecanum 轮的全向移动平台移动性能卓越,其本体无需做出任何转动便可实现任意方向的运动<sup>[6]</sup>。目前工业上常用 4 个独立驱动的 Mecanum 轮组成矩形对称的平面全方位运动系统<sup>[7]</sup>,但 Mecanum 轮组成的四轮全向移动平台的装配精度要求高,是其运动精度难以提高的关键。与 Mecanum 轮相似的全向轮同样具有全向移动的特性,不同点是全向轮的辊子偏执角取  $90^\circ$ ,由 3 个全向轮组成的三轮向心全向移动平台通常用于足球机器人中,具有以直线运动到达目标点的过程中同时自身做旋转运动的特性<sup>[8]</sup>,且三轮向心结构使得其运动快速灵活易于控制<sup>[9]</sup>,而全向轮的承重能力不足,且全向轮上的小轮容易磨损。本文综合 mecanum 轮和三轮向心结构的优点设计一种三轮向心结构布局的 Mecanum

轮全向移动平台,通过合理的布局和轮子速度与旋向的配合实现其在二维平面内的全向移动。文献 [9-10] 中的 Mecanum 三轮移动平台具有 8 个方向的运动,而本文中提出的 Mecanum 三轮移动平台结构,采用不同的布局结构实现真正意义上的 Mecanum 三轮移动平台的全向移动。与常规四轮全向移动平台相比,具有装配精度更易实现、整体驱动性能更高、灵活性更强、扩展性更好等特点,可以更加灵活地在狭窄地形运送小物件以及大型重型物件。

## 1 Mecanum 轮移动平台设计关键

Mecanum 轮设计是移动平台设计的关键,直接影响移动平台全向移动的性能、使用寿命和控制的稳定性。Mecanum 轮设计的关键在于保证其轮子运动的连续性,且为了改善 Mecanum 轮运动的平稳性及提高辊子表面的摩擦系数,必须在辊子的外缘包覆一层聚氨酯弹性体。

Mecanum 轮的工作表面由安装在轮缘上的小辊子的轮廓线组成,其轮廓面的连续与否直接影响

Mecanum 轮的运动性能,因此定义表征全部辊子参与运动的轮廓线总长与轮子周长的比率为  $\varepsilon$ ,称为运动连续性比率系数。运动连续性比率系数:

$$\varepsilon = \frac{N}{2\pi}(\gamma - 2\theta_0) \quad (1)$$

式中,  $N$  为小辊子数目,  $\theta_0$  为辊子端点  $MN$  对应的夹角,  $\gamma$  为曲线  $AB$  在  $xOy$  平面上所对应的圆心角。  $N$ 、 $\theta_0$ 、 $\gamma$  取合适的值,保证公式(1)中  $\varepsilon > 1$  时,即辊子轮廓线总长不小于轮子周长,才可以保证全向轮运动的连续性。



图 1 Mecanum 轮结构图

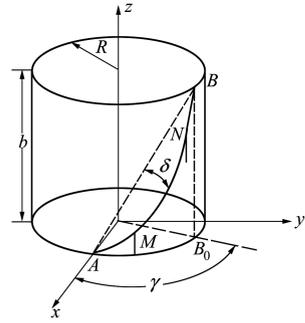


图 2 Mecanum 轮辊子理论轮廓线

Mecanum 轮辊子的理论轮廓线如图 2 所示,  $R$  为 Mecanum 轮理论圆半径,  $b$  为理论轮宽,  $b = 2R\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)$ , 辊子的偏执角取  $45^\circ$ 。辊子轴  $AB$  的表达式为:  $\frac{x - R}{R(\cos\gamma - 1)} = \frac{y}{R\sin\gamma} = \frac{z}{2R\sin(\gamma/2)}$ , 母线  $AB$  的表达式为:  $x = R\cos\theta, y = R\sin\theta, z = \frac{R\sin\theta}{\cos(\theta - \gamma/2)}$ 。则辊子的曲率半径:

$$\alpha = R \sqrt{\left[\frac{\sin\theta}{\cos(\theta - \gamma/2)}\right]^2 - \frac{1}{2} \left[\frac{\sin\theta}{\cos(\theta - \gamma/2)} + \sin\left(\theta - \frac{\gamma}{2}\right) + \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right]^2 - 2\cos\theta + 2} \quad (2)$$

根据辊子的曲率半径可生成辊子包络图, Mecanum 轮设计过程中,不仅要保证公式(1)中  $\varepsilon \geq 1$ ,即辊子运动的连续性。也要保证辊子之间不相互干涉,可根据 Matlab 通过公式(2)生成的辊子包络图,确定出互不干涉的辊子包络图,得到合理的 Mecanum 轮设计参数。

Mecanum 轮设计的关键为:

- 保证轮子运动过程的连续性即运动连续性比率系数  $\varepsilon \geq 1$ ,取适当的  $\theta_0$ (辊子端点  $MN$  对应的夹角)、 $\gamma$ (曲线  $AB$  在  $xy$  平面上所对应的圆心角)和  $N$ (辊子数目)保证  $\varepsilon \geq 1$ 。
- 保证辊子之间互不干涉,即在保证  $\varepsilon \geq 1$  的前提参数下,通过 MATLAB 建立 Mecanum 辊子的三维包络图保证辊子之间不相互干涉,得出适当的辊子参数。

· 为使 Mecanum 轮获得较好的运动性能,辊子的包覆弹性材料可选用聚氨酯弹性体。

## 2 Macanum 三轮移动平台全向移动分析

Mecanum 轮全向移动系统中,当轮数  $n < 3$  时,系统属于静态不稳定支撑系统,如独轮驱动和两轮驱动,必须采取特殊的控制措施来保证运动的稳定性。当  $n \geq 3$  时,运动系统则可以有条件的实现全方位运动<sup>[6]</sup>。文献[9-10]中均提出一种三轮行走机构如图 3 所示。

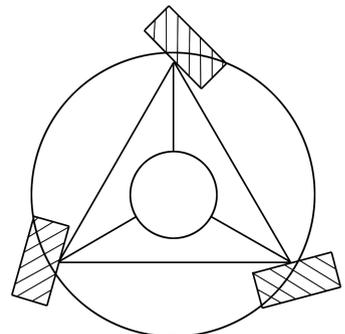


图 3 Macanum 三轮轴向移动平台图

图 3 的 Macanum 三轮轴向移动平台具有沿轴向移动和自转共 8 个方向的移动。

而本文提出的 Macanum 三轮向心移动平台如图 4 所示, 具有在二维平面内全向移动的特性。同样作为三轮全向移动平台, 可以更加灵活地进行二维平面的全向移动。

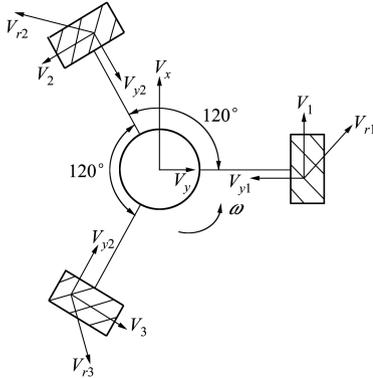


图 4 Mecanum 三轮全向移动平台模型

对于一个实用的 Mecanum 轮运动系统, 为了制造经济合理, 一般系统中所有 Mecanum 轮的结构相同, 图 4 中 Mecanum 三轮全向移动平台中所有的 Mecanum 轮结构完全相同, 几何、运动参数、安装方式也完全相同。通过轮子速度与旋向的配合实现其在二维平面内的全向移动。本文中的 Mecanum 轮均采用 3 个常规的 45° 轮, 分析图 4 可得其运动模型 (逆时针为正向):

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & -1 & R \\ -\frac{\sqrt{3}+1}{2} & \frac{1-\sqrt{3}}{2} & R \\ \frac{\sqrt{3}-1}{2} & \frac{\sqrt{3}+1}{2} & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  分别为 3 个 Mecanum 轮的驱动电机的转速,  $r$  为轮子半径,  $R$  为 3 个轮子到中心的距离,  $V$  为移动平台移动速度,  $V_x$  为移动平台前行的速度,  $V_y$  为移动平台横向移动的速度,  $\omega$  为移动平台自转的转速。

根据公式(3), 可得 Mecanum 三轮全向移动平台运动的速度关系为:

1) 移动平台绕自身中心旋转 ( $V_x = V_y = 0, \omega \neq 0$ ):

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \frac{V}{r} \quad (4)$$

2) 移动平台沿直线运动 ( $V^2 = V_x^2 + V_y^2$ ):

(1) 移动平台自身不旋转:

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{V}{r}(\sin\theta - \cos\theta) \\ \omega_2 = \frac{V}{r} \left( -\frac{(\sqrt{3}+1)}{2}\sin\theta + \frac{1-\sqrt{3}}{2}\cos\theta \right) \\ \omega_3 = \frac{V}{r} \left( \frac{(\sqrt{3}+1)}{2}\sin\theta + \frac{\sqrt{3}+1}{2}\cos\theta \right) \end{cases} \quad (5)$$

(2) 移动平台自身绕中心旋转, 整体以直线形式运动:

移动平台自身绕中心旋转, 整体以直线形式运动时, 将移动平台绕自身中心旋转时各个电机的速度叠加到相应的电机上即可。

3) 移动平台绕空间一点旋转 ( $V_x = V\sin\theta, V_y = V\cos\theta, \omega = 0$ , 旋转半径为  $L$ ):

由伺服系统的最小运动周期  $t$  确定每次旋转的最小角度为  $\Delta\theta$  和需要运动的最小周期时间的次数  $n$ :

$$\Delta\theta = \frac{V\Delta t}{2\pi r} \times \frac{180}{\pi} \quad n = \frac{\theta_1 - \theta_0}{\Delta\theta}$$

移动平台运动的初始时期各电机的速度:

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{V}{r}(\sin\theta - \cos\theta) \\ \omega_2 = \frac{V}{r} \left( -\frac{(\sqrt{3}+1)}{2}\sin\theta + \frac{1-\sqrt{3}}{2}\cos\theta \right) \\ \omega_3 = \frac{V}{r} \left( \frac{(\sqrt{3}+1)}{2}\sin\theta + \frac{\sqrt{3}+1}{2}\cos\theta \right) \end{cases} \quad (6)$$

移动平台开始绕空间指定点旋转时:

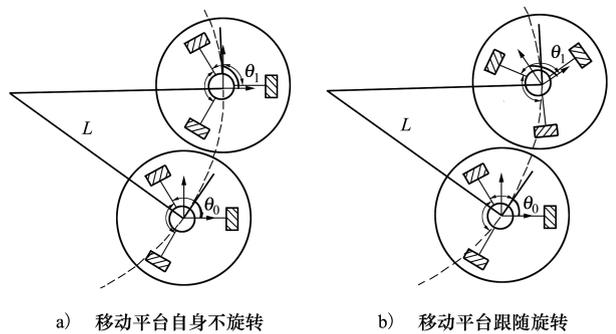


图 5 绕空间一点旋转图

(1) 移动平台自身不旋转 (见图 5a):

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{V}{r}(\sin(\theta_0 - i\Delta\theta) - \cos(\theta_0 + i\Delta\theta)) \\ \omega_2 = \frac{V}{r}\left(-\frac{(\sqrt{3} + 1)}{2}\sin\theta + \frac{1 - \sqrt{3}}{2}\cos\theta\right) \\ \omega_3 = \frac{V}{r}\left(\frac{(\sqrt{3} + 1)}{2}\sin\theta + \frac{\sqrt{3} + 1}{2}\cos\theta\right) \end{cases} \quad (7)$$

(2) 移动平台自身不旋转(见图 5b)):

同样将运动平台绕自身中心旋转时各个电机的速度叠加到相应的电机上即可。

### 3 Mecanum 全向移动平台全向移动仿真分析

Mecanum 轮全方位移动平台共同的不足之处是均存在奇异形,三轮向心结构的优点在于任意方向上最多只有一个轮处于奇异位形,而四轮纵向对称结构中存在 2 个奇异形结构。三轮向心布局的整体驱动性能更好<sup>[6]</sup>。

按照图 4 中 Mecanum 三轮全方位运动的布局结构,建立如图 6a)所示 Mecanum 三轮全向移动平台的 adams 仿真模型,并建立常规的 Mecanum 四轮全向移动平台的 adams 仿真模型如图 6c)所示来进行对比,其中 2 个全向移动平台的 Mecanum 轮的约束条件相同,即保证在同一条件下进行仿真分析。

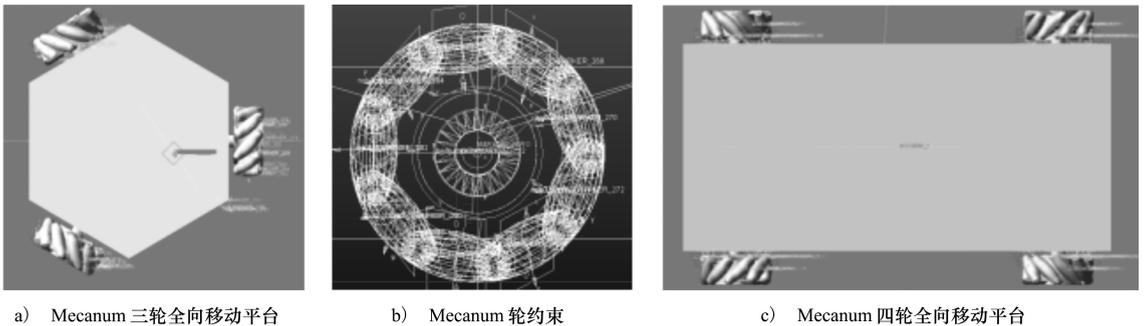


图 6 Mecanum 全向移动平台 adams 仿真模型

图 7 为 2 种 Mecanum 全向移动平台绕自身中心旋转时中心位移量。

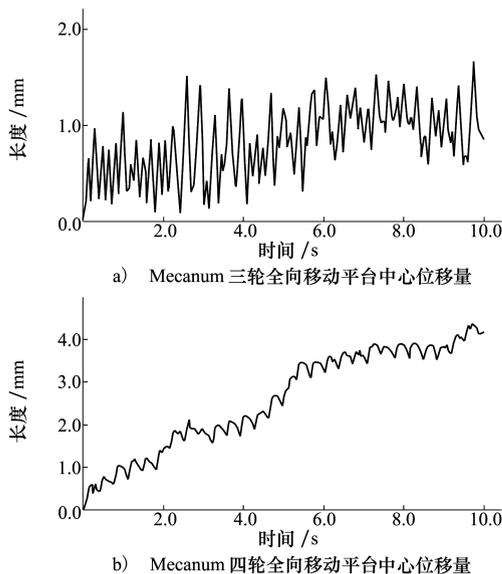


图 7 Mecanum 全向移动平台绕自身中心旋转时中心位移量

分析图 7a)和图 7b)可知同样条件下做旋转运动时,四轮对称结构全向移动平台随着时间推移中心位移偏移量呈积分形式,三轮向心结构的中心位移量随着时间的位移偏移量在一定的范围,三轮向心结构的中心位移量波动较大,但是是在一定的范围内波动,不会对其运动精度产生影响。证明在没有外部控制情况下 Mecanum 全向移动平台的三轮向心布局结构相对于四轮对称布局结构的位移精度更加稳定,可保证其自转精度。

图 8 为 2 种 Mecanum 全向移动平台直线运动时垂直方向的偏移,通过图 8a)和图 8b)的对比可知,随着时间的推移,三轮向心布局的 Mecanum 全向移动平台的偏移速度更快,呈积分的方式发生偏移,而四轮对称布局的 Mecanum 全向移动平台偏移以一定的比例偏移。工业上常用的四轮对称布局的 Mecanum 全向移动平台采用 PID 控制算法,由图 8b)可知,理论上四轮对称布局的 Mecanum 全向移动平台通过 PID 控制的比例控制即可保证其精度,而三轮向心布局的 Mecanum 全向移动平台的灵活

性较大,也导致其偏移速度较快,如图 8a)所示,同样采用 PID 控制方法时需要比例控制、积分控制和微分控制之间的配合,从而保证移动平台的精度。

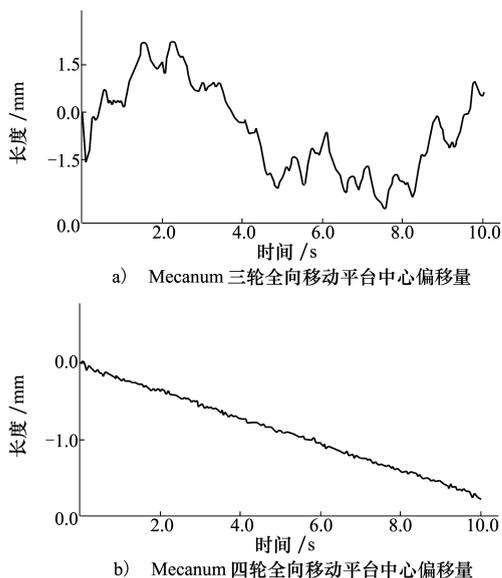


图 8 Mecanum 全向移动平台直线运动时垂直方向的偏移量

Mecanum 三轮向心结构的中心圆盘作为移动平台的主要承重平台,相较于四轮对称不居中移动平台, Mecanum 三轮全方位移动平台的承重中心在其结构的中心,使得各轮的承载力均衡,系统更加稳定可靠,且易于 Mecanum 轮的均布及装配。工业上常用的四轮 Mecanum 对称布局中,需要保证两侧轮子处于同一平面,且前后、左右轮距分别相同,对装配精度要求很高,而全向移动平台的装配精度是其运动精度的前提与保证。

综上可知向心对称均布的 Mecanum 三轮全向移动平台与常规的四轮矩形对称全向移动平台均可实现全向移动,而 Mecanum 三轮全向移动平台整体的驱动性能更好。三轮移动平台的整体结构一般为圆形或者六边形等类圆形,在转弯以及更加狭窄的空间下显得更加灵活。其结构的装配简易性、运动灵活性同样使得其具有更好的集群效果,即更易于实现多个 Mecanum 三轮全向移动平台之间的同步运输,可以更好地在工业物流中运送小物件以及重型大物件。

## 4 结 论

本文提出一种对称向心结构的 Mecanum 三轮全向移动平台,通过运动学分析得出其全向移动的实现方法,并利用 adams 仿真软件对 Mecanum 三轮全向移动平台和常规 Mecanum 四轮对称结构移动平台进行了相应的运动仿真分析,得出 Mecanum 三轮向心布局结构全向移动平台驱动性能更好、灵活性强、可扩展性好等特点。综合来讲:

- Mecanum 三轮对称向心布局结构的全向移动平台的具有装配简易,整车驱动性能较好,灵活性很强,运动稳定且系统负载均匀等特点。
- Mecanum 三轮向心布局结构全向移动平台不仅具有其自身特定的优点,同样具有常规四轮对称结构 Mecanum 轮全向移动平台良好的承载能力及灵活的全向移动能力等特点。
- Mecanum 三轮全向移动平台具有良好的集群潜力,采用合适的控制算法可以更加精准地运送小物件,多个平台集群作业可对大物件实现运送,可组成工业上的高精度全向移动系统。

## 参考文献:

- [1] Adăscăliței F, Doroftei I. Practical Applications for Mobile Robots based on Mecanum Wheels——A Systematic Survey[J]. The Romanian Review Precision Mechanics, Optics and Mechatronics, 2011, 40: 21-29
- [2] How T V. Development of an Anti-Collision and Navigation System for Powered Wheelchairs[D]. Toronto, University of Toronto, 2011
- [3] Xie L, Scheifele C, Xu W, et al. Heavy-Duty Omni-Directional Mecanum-Wheeled Robot for Autonomous Navigation: System Development and Simulation Realization[C]//IEEE International Conference on Mechatronics, 2015: 256-261
- [4] Xie L, Herberger W, Xu W, et al. Experimental Validation of Energy Consumption Model for the Four-Wheeled Omnidirectional Mecanum Robots for Energy-Optimal Motion Control[C]//International Workshop on Advanced Motion Control, 2016
- [5] Lin L C, Shih H Y. Modeling and Adaptive Control of an Omni-Mecanum-Wheeled Robot[J]. Intelligent Control & Automation,

2013(2):166-179

- [6] 王一治,常德功. Mecanum 轮全方位运动系统的约束条件及奇异位形[J]. 上海大学学报, 2009, 15(2): 181-185  
Wang Yizhi, Chang Degong. Motion Restrlicated Condition and Singular Configuration for Mecanum Wheeled Omni-Directional Motion System[J]. Journal of Shanghai University, 2009, 15(2): 181-185 (in Chinese)
- [7] Kim J, Woo S, Kim J, et al. Inertial Navigation System for an Automatic Guided Vehicle with Mecanum Wheels[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(3): 379-386
- [8] 牟学刚,朱劲,蒋平. 三轮全向足球机器人结构设计与系统模型研究[J]. 机械电子工程, 2006(5): 38-41  
Mu Xuegang, Zhu Jin, Jiang Ping. Research on Structural Design and Modeling of a Three Wheel Omni Directional Soccer Robot [J]. Machinery and Electronics, 2006(5): 38-41 (in Chinese)
- [9] 王宾,马超,温秉权. Mecanum 三轮全向移动平台的设计[J]. 机电工程, 2013, 30(11): 1358-1361  
Wang Bin, Ma Chao, Wen Bingquan. Design of Omni-Directional Mobile Platform Based on Three Mecanum Wheels [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(11): 1358-1361 (in Chinese)
- [10] Gfrerrer A. Geometry and Kinematics of the Mecanum Wheel[J]. Computer Aided Geometric Design, 2008, 25(9): 784-791

## Design and Motion Analysis of a Mecanum Three-Round Omni-Directional Mobile Platform

Gao Pengfei<sup>1</sup>, Peng Jiangtao<sup>2</sup>, Yu Weiwei<sup>1</sup>, Li Shujun<sup>1</sup>, Qin Xiansheng<sup>1</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
3.AVIC Chengdu Aircraft Industrial(Group)CO.LTD, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** In order, how to improve the assembly simplicity and flexibility of the conventional Mecanum wheel directional mobile platform, it is a kind of Mecanum three wheeled omni-directional mobile platform, which is designed with symmetrical and concentric layout structure. Based on the analysis of the structural characteristics of the Mecanum wheel and the kinematic model of the Mecanum with three wheeled omni-directional mobile platform. The method has presented realization the omnidirectional motion of the Mecanum and three wheeled omni-directional mobile platform in the two-dimensional plane. The Mecanum and directional mobile platform Mecanum omnidirectional mobile platform on three symmetric layout and the conventional four wheel, radial symmetrical layout of motion simulation, analysis of the omnidirectional mobile platform Mecanum three symmetrical layout has been simple assembly, centripetal driving causes have better performance flexibility, better scalability, and puts forward the application potential of industrial logistics.

**Keywords:** Mecanum wheel; three wheels of symmetrical and concentric layout structure; motion simulation