

# Design and Locomotion Analysis of an Unit for Reconfigurable Robots

Changlong Ye<sup>1,2</sup>, Shugen Ma<sup>2,3</sup>, Bin Li<sup>2</sup>, Hongjun Liu<sup>1</sup>

<sup>1)</sup> School of Machinery and Automobile, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 110136

<sup>2)</sup> Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016

<sup>3)</sup> Center for Promotion of COE Program, Ritsumeikan University, Japan, 525-8577

(E-mail: clye@sia.cn Shugen@fc.ritsumei.ac.jp libin@sia.cn)

**Abstract**—Mechanism Design of a modular universal unit (MUU) is presented in this paper. This unit is a basic cell of reconfigurable robot. We can develop the 3D snake-like robot, car-like vehicle and manipulator with MUUs. The MUU behaves Pitching, Yawing and Rolling D.O.F, among of which Pitching and Yawing are actuated by means of differential driving system for getting large propulsion. A series of passive rollers around the cylindrical aluminum shell of MUU form an actuating wheel for the omnidirectional mobile robot. The communication and replacement is feasible due to high integration of MUU. Two or more MUUs can be connected to move or to be a manipulator, which exhibits high mobility and agility of MUU. Some typical configurations of robot composed of these MUUs are analyzed for locomotion control. The kinematics and controllability of proposed robots are analyzed for self-reconfigurable commission. Some locomotion experiments are given to show characteristic of MUU.

**Keywords**—Reconfigurable robot, Modular unit, Omnidirectional motion, Kinematics

## 一种可重构移动机器人单元的设计与运动分析

叶长龙<sup>1,2</sup> 马书根<sup>2,3</sup> 李斌<sup>2</sup> 刘红军<sup>1</sup>

<sup>1)</sup> 沈阳航空工业学院机械与汽车学院 沈阳 110136

<sup>2)</sup> 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室 沈阳 110016

<sup>3)</sup> 立命馆大学 COE 推进中心 日本 525-8577

**摘要** 设计了一种模块化万向单元 (MUU), 它是构成可重构机器人的基本单元。通过配置单元之间的连接关系可以组成蛇形机器人、车形机器人、腿式机器人和操作臂等复杂机构。该模块具有三个自由度, 分别为俯仰、偏航和回转自由度, 其中俯仰和偏航自由度通过差动机构来耦合驱动以获得较大的输出力矩。该模块具有圆柱形外壳, 在外壳上面设计了一周的被动轮。这些被动轮也组成一个大的驱动轮, 可以驱动可重构机器人实现比较复杂的运动。由于高度的集成性, 单元之间的通讯和互换非常易于实现。两个以上的 MUU 连接体就可以实现控制下的运动, 展示出了 MUU 的高运动性能。分析了几种由 MUU 组成的可重构机器人的运动学模型及可控性, 并给出了几种可重构机器人的运动实验。

**关键词** 可重构机器人, 模块化单元, 全方位运动, 运动学

### 1. 引言

可重构机器人通常由结构相同或结构不同的模块相互连接组成。这些模块通常是高度集成的: 包括控制、感知、通信和连接等等。可重构机器人可以通过重新布置模块的相对位置来改变构型或移动到指定位置。与传统的机器人系统相比, 可重构机器人具有很多优点。由于这类机器人具有自维修能力和很高的适应能力, 所以对于非结构环境

和危险环境具有潜在的应用价值。例如: 这类机器人可以应用到核电站的检查、外空间的探索和城市搜救。

近年来, 可重构机器人成为机器人研究领域的热点研究内容。相关的研究包括与可重构机器人相关的有效运动和变形方面的运动控制方法和规划。可重构机器人的理论可以参见参考文献[1-9]。

本文中介绍了一种具有三个自由度的可重构机器人关

节机构—MUU (Modular Universal Unit)。由于两个以上该单元的连接体就能够完成控制下的运动与操作，所以由该单元组成的可重构机器人具有很高的运动性能。MUU 也可以用作移动体的驱动轮，这增加了单元的潜在应用性。图 1 所示为：由该单元组成的蛇形机器人，两个单元的连接体，四轮驱动的全方位车和机械手。这些可重构移动机器人展现出了该单元的潜在应用。

## 2. 单元设计

模块化单元的机构设计是可重构机器人的基础。许多具有一个自由度的、简单结构的模块化单元被开发来组合成可重构机器人。然而，由于这类单元在机构和运动上的局限性，往往需要很多单元体才能组成具有一定功能的可重构机器人。所以，本文介绍了一种具有三个自由度的可重构机器人单元。它具有俯仰、偏航和回转三个自由度。采用三个高力矩直流伺服电机 FutabaS3305 作为单元的驱动器。单元的俯仰和偏航运动是通过由三个伞齿轮组成的差速机构耦合驱动的（图 2a）。差速机构增加了输出力矩与单元质量的比率，使该单元能够抬起两个相同模块。电机和伞齿轮之间的传动比为 2:1，同时电位计配置在电机的输出轴上来实现位置伺服。选用松下锂电池为单元提供能源。控制单元为 16 位的富士通处理器。各个单元之间通过 CAN 总线实现通讯。在单元的圆柱形外壳上安装一周的被动轮。这些被动轮使得在沿着单元的躯干方向很容易滑动，而在垂直于躯干方向很难滑动。三个转动轴相交于一点避免了运动奇异。如图 2b 所示， $\alpha, \beta, \gamma$  分别表示三个自由度变量。MUU 的技术参数见表 1，外形尺寸为 172mmX120mm（圆周尺寸），重量约 1kg。图 2c 为 MUU 的硬件照片。

表 1 MUU 的技术参数

自由度数量	3（俯仰，偏航，回转）
驱动器	FutabaS3305
整体尺寸	172mm（长）x120mm（直径）
工作空间	-90° ~90°（俯仰，偏航）连续（回转）
关节质量	1kg
力矩	3.56Nm（俯仰，偏航）1.78Nm（回转）
关节的角速度	2.6rad/s（俯仰，偏航，回转）

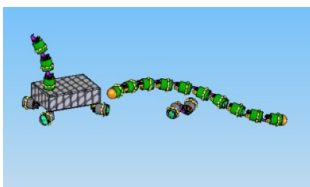
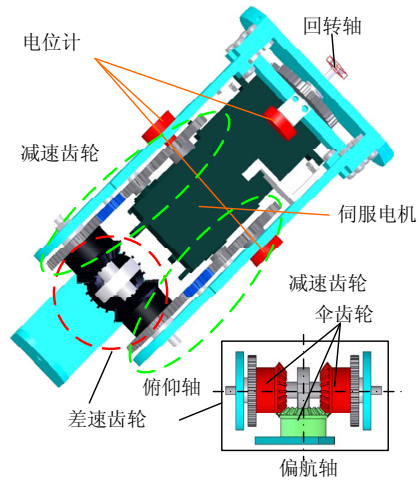
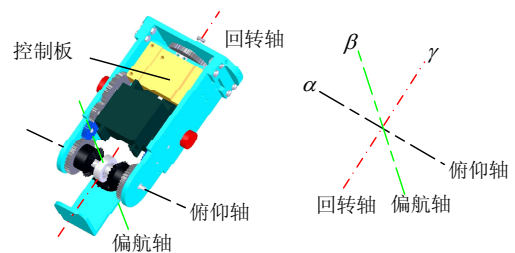


图 1 MUU 单元组成的可重构机器人



a MUU 内部结构



b 自由度



c 硬件结构

图 2 MUU 的结构

## 3. 体轮设计

体轮设计是为了实现机器人与地面的有效接触以获得有效的驱动力。一系列的被动轮被安装在机器人的身体周围，防止身体与周围环境磕碰，同时也实现了避障和减少摩擦力。这些被动轮形成了一个大的体轮，也就是说，整个单元本身也形成了一个体轮。轮子上的被动轮使得在单元的法向方向存在较大的摩擦力，在单元的切向方向上存在较小的摩擦力。被动轮的形状为纺锤形，它的半径与体轮的半径相等，如图 3 所示。回转自由度的驱动使体轮成为驱动轮；同时纺锤形被动轮保证了体轮与地面或障碍物的连续接触。被动轮被嵌入到单元的外壳上以减少单元的外部尺寸。当回转自由度驱动体轮旋转时，作用力将作用在身体的法线方向，其它方向的作用力将由被动轮卸载。

从这一点上讲，体轮是一个万向轮，这有利于机器人的运动。被动轮被安装在两个单元俯仰轴的中线位置（图4），有利于机器人的运动和建模[10]。当 MUU 上的固定边被驱动到与回转轴线垂直的位置时，偏航轴与回转轴的轴线重合，此时通过驱动偏航自由度就可以驱动 MUU 旋转来产生驱动力。当固定边位于中间位置时，通过驱动偏航自由度可以使回转轴线完成一个圆锥动作，如图5所示。

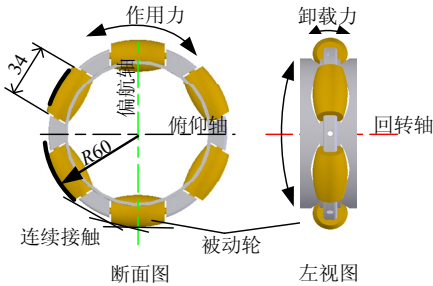


图3 体轮结构

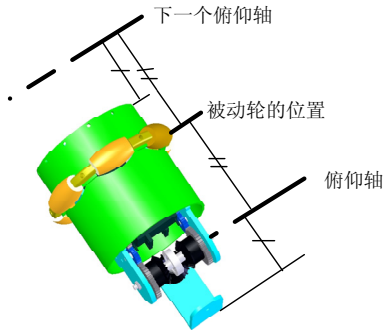


图4 体轮位置

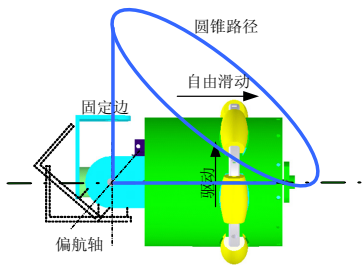


图5 MUU 作为驱动轮

#### 4. 几种典型构型

MUU 模块主要是为开发三维蛇形机器人和模块化操作臂而设计的。当然，作为模块化单元，它可以组成其它期望的各种构型。如果在 MUU 的接口位置增加连接机构和相应的传感器，它可以实现与其它单元的自动连接和脱离，完成自维修和自重构任务，将在以后的工作中研究该问题。

首先，通过将 MUU 连接成串联结构组成了三维蛇形

机器人。该蛇形机器人具有强的驱动力和灵活性，能够跨越障碍物。

第二，MUU 可以与蛇形机器人脱离来完成维修和重构任务，这需要 MUU 具有很强的运动能力。通常，可重构机器人需要很多单元才能组成一个构型或改变运动构型。MUU 的运动能力决定着机器人的可重构能力。MUU 表现出了超强的运动能力，单个 MUU 也能够移动一定的距离。两个或两个以上单元可以组合到一起完成控制下的复杂运动，这使 MUU 的重构更加容易。

单个 MUU 的运动：当体轮在地面上转动时，MUU 的固定边支撑在地面上以获得驱动力。此时，体轮和圆柱形外壳同时与地面接触获得稳定位姿，从而防止了体轮上的被动轮引起的滑动。因为存在的三个支撑点中有两个支撑点是不能滑动的，所以仅仅一个单元无法在地面上滑动，如图6所示。在这种情况下，MUU 的运动与单个轮子的运动类似，该运动是不可控的。两个单元的组合体可以象汽车一样实现存在最小转弯半径的运动。该状态下，可以控制两个单元的组合体实现确定运动。此时，一个 MUU 作为驱动轮而另一个 MUU 作为方向轮来控制组合体的运动方向。同样，两个 MUU 的组合体也存在三个接触点来获得稳定位姿。图7所示，回转 MUU 体轮上的被动轮和圆柱形外壳的边缘共同与地面接触避免了侧向滑动。否则，两个 MUU 的组合体可以绕某一点自由转动，无法实现运动控制。如图8所示：如果没有圆柱形外壳的侧边与地面的接触，两个 MUU 的组合体可以绕点 P 自由转动，这种转动是不可控制的。从图8中的坐标关系设定，可以建立两个 MUU 的组合体运动学模型：

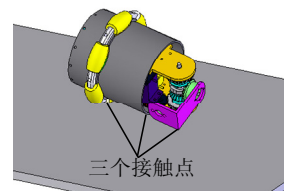


图6 单个 MUU 的运动分析

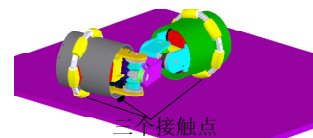


图7 两个 MUU 连接体运动分析

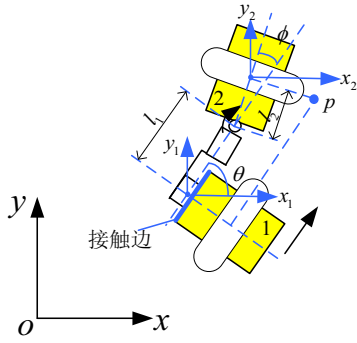


图 8 两个连接体的运动学模型

几何约束:

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 + l_1 C(\theta) + l_2 C(\theta + \phi) \\ y_2 &= y_1 + l_1 S(\theta) + l_2 S(\theta + \phi) \end{aligned} \quad (1)$$

速度约束:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 S(\theta) - \dot{y}_1 C(\theta) &= 0 \\ \dot{x}_2 S(\theta + \phi) - \dot{y}_2 C(\theta + \phi) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

因此,可以得到如下的控制方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(\theta) \\ S(\theta) \\ S(\phi) \\ 0 \end{bmatrix} R\omega_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{l_2}{l_1 C(\phi) + l_2} \\ 1 \end{bmatrix} \dot{\phi} \quad (3)$$

其中,  $(x, y)$  是 MUU 上参考点的坐标,  $R$  是该机器人轮子的半径。  $\omega_1$  表示 1 轮的转速,  $\theta$  是单元的方向角,  $\phi$  是关节的旋转角度, 它控制着单元的移动方向。  $l_1, l_2$  分别表示从驱动轮的转动轴到作为脚轮单元的转动关节的距离和关节到被动轮的距离。  $C(\cdot)$  和  $S(\cdot)$  表示  $\cos(\cdot)$  和  $\sin(\cdot)$ 。式 3 说明两个 MUU 组成的连接体是可控的。这种与汽车类似的构型对于完成移动和可重构的任务是行之有效的。

虽然 MUU 的较大工作空间减小了其回转半径, 但是在极限情况下该连接体会出现奇异构型, 如图 9 所示。当关节转角设定在 90 度时, 该连接体的运动不再可控。其原因是驱动轮与脚轮此时处于相互垂直的位置。实际上, 由于体轮无法协调接触边的旋转速度与体轮旋转速度之间的关系。回转半径的差异使得体轮的线速度大于接触边的线速度。所以在 MUU 与地面之间经常会出现打滑现象, 而且随着转弯角度的增大打滑将会越来越明显。为了保证运动的性能, 将转弯时关节角度的变化范围设定在从 -45 度到 45 度的范围。当运动体出现奇异情况时, 它可以改变车体的驱动方式实现继续运动。如图 10 所示, 当处于奇异位

置时, 两个体轮可以采用同时驱动的方式运动。在运动过程中, 两个车体始终有三点与地面接触, 其中两点为体轮上的被动轮与地面的接触点。另外一点为两个体轮中的一个圆柱边缘与地面的接触点, 该接触点对连接体避免沿转动轴线方向的滑动起着至关重要的作用。当两个体轮以相同的速度同向转动时, 连接体实现向前运动。当两个体轮以相同速度反向运动时, 连接体实现原地转动。由以上分析可知, 可以控制两个单元的连接体到达任意位置。

最后, 这个 MUU 可以被用作四轮驱动车, 由于 MUU 的被动轮的配置, 该车可以全方位移动。如图 11 所示, 具有四个支撑轮的车体由四个 MUU 来驱动可以实现全方位运动。分析四轮全方位车的运动学模型以便对其全方位运动进行控制。如图 123 所示, 轮 MUU1 的几何约束为:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_b + l_1 C(\theta_b) + l_2 S(\theta_b) \\ y_1 &= y_b + l_1 S(\theta_b) - l_2 C(\theta_b) \end{aligned} \quad (4)$$

轮 MUU1 的速度约束为:

$$\dot{x}_1 C(\theta_1) + \dot{y}_1 S(\theta_1) = R\dot{\gamma}_1 \quad (5)$$

类似地, 可以推出其它轮的约束方程。综合各个方程可以得到总的控制方程为:

$$\begin{bmatrix} C(\theta_1) & S(\theta_1) & a_1 C(\theta_1) + b_1 S(\theta_1) \\ C(\theta_2) & S(\theta_2) & a_2 C(\theta_2) + b_2 S(\theta_2) \\ C(\theta_3) & S(\theta_3) & a_3 C(\theta_3) + b_3 S(\theta_3) \\ C(\theta_4) & S(\theta_4) & a_4 C(\theta_4) + b_4 S(\theta_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中,  $a_i, b_i$  是轮子的位置参数, 这些参数与轮子在车体上的相对位置有关。  $\theta_b, \omega_i$  是车体的角度参数和轮子的角速度。下标  $i$  表示轮子的编号。

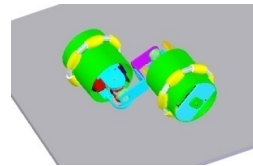


图 9 两个 MUU 连接体在奇异位置的运动

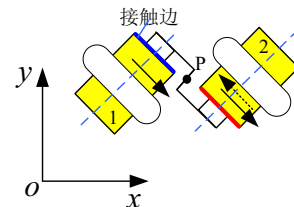


图 10 连接体的运动学分析

从式 6 可以看出四轮车系统为过约束系统，因为三个轮子就已经使车体可控制。第四个轮子只是为了增加车体运动的稳定性，该轮的运动必须与其它轮的运动协调。式 6 表明车体可以沿  $x$  轴和  $y$  轴运动也可以实现转动。例如：当 1, 3 轮以相同的速度回转时，车体沿着一个方向运动。当 2, 4 轮以相同的速度回转时，车体沿着另一个方向运动。当所有四个轮以相同速度运动时，车体实现绕身体中心的转动。

从以上分析，可以得出四轮车是可以控制的全方位机器人。体轮不仅可以实现绕回转轴的回转而且可以实现圆锥状的摆动，这使得该车可以跨越一些障碍物。此时，MUU 可以被看作是机器人的腿，支撑起机器人实现越障，如图 11 右所示。轮子作圆锥状运动驱动车体前进。

### 5. 实验

作为蛇形机器人的三自由度单元，MUU 展现出了很高的运动性能。蛇形机器人可以作蜿蜒运动，侧向运动和其它能够适应复杂地形的三维运动。作为可重构机器人的基本单元，单个 MUU 的移动是无法控制的，因为 MUU 的运动方向受到与地面接触的支撑边的影响，如图 13 所示。在某些情况下，支撑边会绕着体轴旋转，而此时 MUU 因无法转动而停止运动。两个 MUU 的连接体能够实现类似小车的运动。在平行配置下，两个 MUU 可以实现差速运动，如图 14 和 15 所示。图 16 表明四轮车能够实现全方位运动。所有的实验已经证明 MUU 在机动性、移动性和可重构方面具有很高的能力。

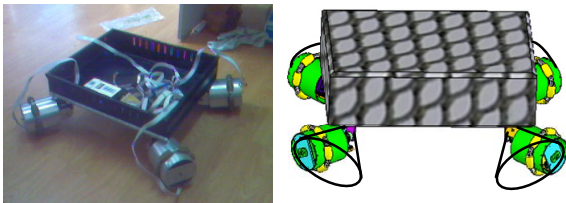


图 11 四轮车的实体及模型

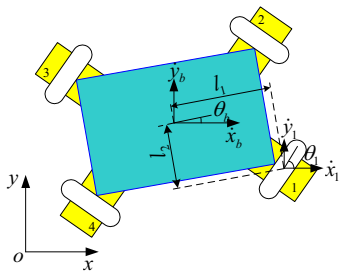


图 12 四轮车的运动学模型

本文介绍了为可重构机器人设计的新型单元 MUU。它具有三个自由度，其中俯仰和偏航自由度由差动机构来耦合驱动。MUU 可以组成多种构型，例如：蛇形机器人，两个单元连接体和四轮驱动车。为实现机器人的控制，建立了由 MUU 构成的可重构机器人的运动学模型。实验结果验证了 MUU 单元的机动性和运动能力。在以后的研究中，将重点解决可重构机器人的控制和可重构机器人的连接机构。



图 13 MUU 单体运动.



图 14 两个 MUU 连接体的车式运动

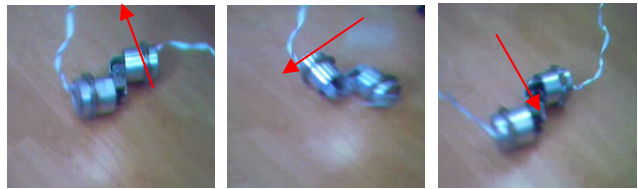


图 15 两个 MUU 连接体的运动



图 16 四轮车的原地转动

### 6. 结论与展望



图 17 四轮车的直线运动

### 参考文献

- [1] D. Johan Christensen, "Evolution of shape-changing and self-repairing control for the ATRON self-reconfigurable robot," Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida-May 2006, pp.2539-2545
- [2] S.Murata, E.Yoshida, A.Kamimura, H. Kurokawa, K. Tomita, and S.Kokaji, "M-TRAN: self-reconfigurable modularrobotic system, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 7(4),pp.431-441,2002
- [3] S.Murata, H.kurokawa, E.Yoshida, K.Tomita, and S.Kokaji, "A 3-d self-reconfigurable structure." In Proceedings, IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation(ICRA), 1998
- [4] K.Kotay and D.Rus, "Algorithms for self-reconfiguring molecule motion planning. In Proc. Of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2000.
- [5] C.Unsal, H.Kiliccote and PK.Khosla, "I-cube:a modular self-reconfigurable bipartite robotic system." Proceedings,SPIE Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems II, bolume3839,pp.258-269.1999
- [6] T.Fukuda and S. Nakagawa, "dynamically reconfigurable robotic system," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA998), May 1998, pp.1581-1586
- [7] S.Murata, E.Yoshida, H.Kurokawa, K.Tomita, and S.Kokaji, "Self-repairing mechanical system," Auton. Robots, vol.10, pp.7-21,2001
- [8] K.Kotay and D.Rus, "Motion synthesis for the self-reconfigurable modules," in Proc. 1998 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.(IROS1998),pp.843-851
- [9] A.Kamimura, H.Kurokawa, E.Yoshida, S.Murata, K.Tomita, and S.Kokaji, "Automatic locomotion design and experiments for a modular robotic system," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, v.10, n3, June 2005, pp.314-325
- [10] S. Ma, "Development of a Creeping Snake-Robot," Int: Journal of Robotics and Automation, vol.17, No 4, pp.146-153, 2002