doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2024.03.008

可变形模块化履带机器人构型转换原理与验证①

张兆详^{②***} 冯靖凯****** 刘金国****** 张荣鹏******

(*沈阳化工大学信息工程学院 沈阳 110142)

(**中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016)

(**** 中国科学院大学 北京 110049)

(**** 中国科学院机器人与智能制造研究所 沈阳 110169)

摘要为实现机器人在不同环境中能够通过改变自身构型跨越障碍并完成任务,需对可变形模块化履带机器人构型之间的相互转换进行研究。以具有27种构型的机器人为研究对象,该机器人构成一个构型网络,每种构型被定义为加权定向构型网络中的一个节点。从一种构型到另一种构型的转换由非负权值的有向路径表示,权值均为1。采用 Floyd 算法,通过对距离矩阵和路由矩阵的迭代计算,求出构型网络中任意2种构型之间 相互转换的最短步数与经过的中间构型。实物实验给出了可变形模块化履带机器人27 种构型之间的相互转换以及面对不同环境以不同的构型应对的结果。实验结果表明,该 机器人可以通过最短路径实现构型之间的相互转换,并且随着所处环境的不同,机器人可 以改变自身构型顺利跨越障碍并完成任务。

关键词 模块化;可变形;履带机器人;构型转换

履带机器人具有与地面接触大、接地比压小、不 易打滑等优点,在灾后救援^[14]、宇宙探测^[5]、海洋 开发^[6-7]、空间探索^[89]等领域发挥着重要作用。履 带机器人的参与可以有效提高救援效率并减少人员 伤亡,它们不但能够帮助工作人员执行任务,而且能 够代替工作人员进入危险区域,起到保护工作人员 生命安全的作用。

可变形模块化履带机器人作为履带机器人的一种,由于其具有高度的灵活性和强大的环境适应能力,逐渐受到国内外关注。文献[10,11]研制了一种可变形机器人系统 AMOEBA-I,其由 3 个模块构成,通过偏航关节、俯仰关节的运动实现机器人构型的转换。文献[12]研究出具有复杂环境适应能力的可重构履带机器人,该机器人通过 4 个运动模块的不同组合形式实现机器人构型的转换。文献[13,14]

提出了一种变形虫 II(AMOEBA-II)型履带式机器 人爬楼梯的在线控制方法,其主要由偏航模块和驱 动模块组成。偏航模块的运动可以实现 AMOEBA-II 的构型转换。文献[15]研究了一款拥有副履带 的机器人,通过副履带的俯仰运动,机器人可以顺利 跨越障碍。文献[16]研究了一种可变形履带轮混 合机器人(Kylin),该机器人集轮式运动和履带运动 的优点于一体,由2条主驱动履带和4条辅助履带 组成,副履带只有俯仰运动功能,驱动能力由2条主 履带提供。

和上述履带机器人相比,本文研究的可变形模 块化履带机器人主要不同于其由5个模块组成,包 括1个主模块和4个副模块,主模块具有2个自由 度,每个副模块具有3个自由度,整个机器人具有 14个自由度。副模块通过俯仰与偏航运动改变机

① 国家重点研发计划(2018YFB1304600)资助项目。

② 男,1994年生,硕士生;研究方向:变形机器人运动控制;联系人,E-mail: zzx13558338335@163.com。 (收稿日期:2022-07-13)

器人的构型,使机器人具有丰富的构型(27种构型)。此外,该机器人不仅主模块有驱动能力,每个 副模块自身也具有驱动能力,大幅提升了机器人的 牵引力,使其在灵活性和运动能力方面均得到很大 提升。

本文内容组织如下。第1节介绍可变形模块化 履带机器人的构型转换原理,以及27种构型之间的 连接网络(构型网络)。第2节详细讨论了构型网 络中任意2种构型之间相互转换最短路径的求解方 法。第3节通过实验验证该机器人通过最短路径可 实现任意2种构型之间的转换,并且在面对不同的 环境时,机器人通过转换构型可实现跨越障碍。第 4节对全文进行了总结。

1 可变形模块化履带机器人的建模

1.1 可变形模块化履带机器人的构型转换原理

为了提高可变形模块化履带机器人的适应复杂

环境的能力,本文研究了机器人多种构型之间相互 转换的最短路径和不同构型的越障能力。可变形模 块化履带机器人模型,如图1所示,图中 θ_{o} 为俯仰 角度(0~180°), θ_{γ} 为偏航角度(0°或 180°), 主模 块与4个副模块之间有连接臂,具有很强的灵活性, 可以改变机器人的形状,每个模块具有独自的驱动 电机,而连接臂在机器人构型转换中起着重要的作 用。图 1(a) 中是机器人的初始构型, A、B、C、D 4 个副模块的运动相同,即每个副模块具有俯仰运动 和偏航运动。以模块 M1 为例,当 A 模块俯仰关节 打开时,机器人由图1(a)构型转换为图1(b)构型。 M1 模块俯仰关节打开的同时,打开偏航关节,机器 人由图1(b)构型转换到图1(c)构型。这种模块化 履带机器人可以通过副模块的运动,使机器人具有 丰富的构型种类。值的注意的是,每个副模块在做 偏航运动前,需要将俯仰关节打开。该变形机器人 通过每个副模块的俯仰和偏航运动,实现机器人的 构型转换。



可变形模块化履带机器人通过无线控制系统, 可以快速从一种构型转换到另一种构型,表1展示 了机器人全部的构型种类(27种构型)。可变形模 块化履带机器人具有多种构型,可以改变其形状以 满足不同的环境要求。表1中定义副模块俯仰/偏 航关节打开为1,否则为0,采用二进制表示关节的 状态共占8(0~7)位,从左至右依次是M1模块到 M4模块的俯仰与偏航关节的状态。即第7位表示 M1模块的俯仰关节状态,第6位表示M1模块的偏 航关节状态,第5位表示M2模块的俯仰关节状态, 第4位表示M2模块的偏航关节状态,第3位表示 M3模块的俯仰关节状态,第2位表示M3模块的偏 航关节状态,第1位表示 M4 模块的俯仰关节状态, 第0位表示 M4 模块的偏航关节状态。

1.2 可变形模块化履带机器人的构型网络

可变形模块化履带机器人具有多种非同构构型,在构型网络中有些构型直接相连,而有些构型却相距甚远。直接相连的2个构型经过一步变换就可以完成构型转换,没有直接相连的2个构型需要经过中间构型完成转换。

如图 2 所示,可变形模块化机器人在构型网络 中有 27 种构型。如上所述,每个构型都是网络中的 一个节点,每条边表示仅通过单个模块的一个简单 运动完成构型的转换。值得注意的是,并非每个构

构型种类	俯仰/偏航关节状态 (二进制表示)	对应节点(顶点)号	实际构型
"C1"构型	00000000	1	
"C2"构型	10000000	2	
"C3"构型	11000000	3	
"C4"构型	10000010	4	
"C5"构型	11000010	5	
"C6"构型	11000011	6	
"C7"构型	10100000	7	
"C8"构型	11100000	8	
"C9"构型	00100010	9	
"C10"构型	10100010	10	
"C11"构型	11100010	11	
"C12"构型	00100011	12	
"C13"构型	10100011	13	
"C14"构型	11100011	14	
"C15"构型	11110000	15	
"C16"构型	10110010	16	
"C17"构型	11110010	17	
"C18"构型	00110011	18	
"C19"构型	10110011	19	
"C20"构型	11110011	20	
"C21"构型	10101010	21	
"C22"构型	11101010	22	
"C23"构型	11101011	23	
"C24"构型	11111010	24	
"C25"构型	10111011	25	
"C26"构型	11111011	26	
"C27"构型	11111111	27	

表1 机器人构型种类说明



图 2 可变形模块化履带机器人的构型网络

型都与其他构型相邻。

从图 2 中可以看出,构型网络中有 46 条边,由 于边数太多,下面只介绍模块 M1、模块 M2、模块 M3 和模块 M4 的独自运动方式。

(1)"C1"→"C2":模块 M1 的俯仰关节在左视
 图中逆时针旋转 180°;"C2"→"C1":模块 M1 的俯
 仰关节在左视图中顺时针旋转 180°。

(2)"C2"→"C3":模块 M1 的偏航关节在俯视
 图中顺时针旋转 180°;"C3"→"C2":模块 M1 的俯
 仰关节在俯视图中逆时针旋转 180°。

(3)"C3"→"C8":模块 M2 的俯仰关节在左视
 图中顺时针旋转 180°;"C8"→"C3":模块 M2 的俯
 仰关节在左视图中逆时针旋转 180°。

(4)"C8"→"C15":模块 M2 的偏航关节在俯视图中逆时针旋转 180°;"C15"→"C8":模块 M2
的偏航关节在俯视图中顺时针旋转 180°。

(5)"C10"→"C21":模块 M3 的俯仰关节在右
 视图中逆时针旋转 180°;"C21"→"C10":模块 M3
 的俯仰关节在右视图中顺时针旋转 180°。

(6)"C26"→"C27":模块 M3 的偏航关节在俯视图中顺时针旋转 180°;"C27"→"C26":模块 M3 的偏航关节在俯视图中逆时针旋转 180°。

(7)"C3"→"C5":模块 M4 的俯仰关节在右视
 图中顺时针旋转 180°;"C5"→"C3":模块 M4 的俯
 仰关节在右视图中逆时针旋转 180°。

(8) "C5"→"C6": 模块 M4 的偏航关节在俯视

图中逆时针旋转 180°; "C6"→"C5": 模块 M4 的偏 航关节在俯视图中顺时针旋转 180°。

从图 2 中可以看出,构型"C2"与构型"C3"、构 型"C7"和构型"C4"相邻,因此它们之间的构型转 换只需要一个步骤就可以完成。而它们远离构型 "C6",相互之间的构型转换至少需要 3 个步骤。可 变形模块化履带机器人从构型"C1"转换到构型 "C11"时,有多条路径,分别是"C1→C2→C3→C8→ C11"、"C1→C2→C7→C8→C11"、"C1→C2→C3→ C5→C11"、"C1→C2→C3→C10→C11"和"C1→C2 →C3→C4→C11"。然而,从构型"C6"到构型"C2" 路由的数量很多,因此,如何找到最佳路径完成 2 种 构型之间的转换是构型转换的关键问题。

2 可变形模块化履带机器人构型转换 算法与控制

2.1 最短路径求解

给定可变形模块化履带机器人的所有非同构构型,可以用一个构型网络来表示它们。该网络是一个有向图 *G* = (*V*,*E*),其中节点集 *V*包含所有这些非同构构型,边集 *E*包含连接构型的所有边。由于构型转换发生在同一个机器人平台上,因此 *G* 是一个连通网络,它是一个没有自循环和重复节点的简单图。

对于具有 n 个构型的有向构型网络 G = (V, - 293 - *E*),如果第*i*个构型可以直接转换到第*j*个构型,或 者它们由一条边直接连接,则*a*是一个 $n \times n$ 的矩 阵,a(i, j) = 1,否则为 ∞ 。即:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & (i,j) \in E \\ \infty & \ddagger \& \end{cases}$$
(1)

上述矩阵可以很容易地表示构型网络的连接情况,这对于以计算机程序可以操作的形式表示网络 非常有帮助。

Floyd 算法采用的是动态规划思想,其状态转移 方程如式(2)所示。

$$matrix[i, j] = \min\{matrix[i, k] + matrix[k, j], matrix[i, j]\}$$

$$(2)$$

其中 matrix[i, j] 表示节点 i 到节点 j 的最短距离, k 是穷举 i 到 j 之间可能经过的中间点。当中间点为 k 时,对整个矩阵即从 i 到 j 的路径长度进行更新,对 所有可能经过的中间点进行遍历以得到全局最优的 最短路径。算法的单个执行将找到所有顶点对之间 的最短路径长度,虽然它不返回路径本身的细节,但 是可以通过对算法的简单修改来重建路径。利用这 个思想,通过递归的方式访问每条路径经过的中间 节点,对最终的路径进行输出。

通过 Floyd 算法计算图 2 中各个顶点的最短路 径时,需要引入 2 个矩阵,即距离矩阵 **D** 和路由矩 阵 **P**。矩阵 **D** 中的元素 $D_k[i][j]$ 表示顶点 i (第 i个顶点) 到顶点 j (第 j 个顶点) 的距离。矩阵 **P** 的 元素 $P_k[i][j]$ 表示顶点 i 到顶点 j 经过了 $P_k[i][j]$ 记录的值所表示的顶点。k 表示遍历节点,当k = 0时,表示机器人最初构型,没有发生构型转换。对于 每个顶点 v,和任一定节点对 $(i, j), i \neq j, v \neq i, v \neq$ j。如果 D[i][j] > A[i][v] + A[v][j],则将D[i][j] 更新为 <math>D[i][v] + D[v][j] 的值,并将 P[i][j] 改为 v。在距离矩阵中,行是"出发构型"节 点,列是"终点构型"节点。"∞"用于表示没有直接 连接这 2 个节点的边,或者没有沿该方向的构型转 换。图 2 的距离矩阵是一个 27 × 27 矩阵,如附录中 式 A.1 所示。

距离矩阵求解公式如式(3)所示:

$$D_k(i, j) = -294 - -$$

$$\begin{cases} D_{k-1}(i,k) + D_{k-1}(k,j) \\ D_{k-1}(i,j) > D_{k-1}(i,k) + D_{k-1}(k,j), \ i \neq j \\ D_{k-1}(i,j) \\ D_{k-1}(i,j) \leqslant D_{k-1}(i,k) + D_{k-1}(k,j), \ i \neq j \\ \infty \qquad \qquad i = j \end{cases}$$

$$(3)$$

可变形模块化履带机器人共有 27 种构型,因此 1 $\leq k \leq 27$, 1 $\leq i, j \leq 27$,即从节点"C1"开始遍 历,依次得到距离矩阵 D_1, D_2, \dots, D_{27} 。最终距离矩 阵 $D_{27}(i, j)$ 表示构型网络中,任意 2 种构型之间相 互转换的最短路径,如附录中式 A.2 所示。

从矩阵 **D** 中可以容易地看出一种构型转换到 另一种构型需要经过的步数,例如:**D**₂₇(3,7) = 2, 即构型"C3"到构型"C7"需要 2 个步骤。图 2 的路 由矩阵同样是一个 27 × 27 的矩阵,路由矩阵在没有 选取节点遍历时,初始化路由矩阵如式(4)所示,若 *i* = *j* 表示构型不转换,如式(5)所示。

$$\boldsymbol{P}_{0} = \begin{pmatrix} -1 & \cdots & -1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & \cdots & -1 \end{pmatrix}_{27 \times 27}$$
(4)

路由矩阵的计算公式如式(5)所示。

$$P_{k}(i, j) = \begin{cases} k & D_{k-1}(i, j) > D_{k-1}(i, k) + D_{k-1}(k, j), \ i \neq j \\ P_{k-1}(i, j) & D_{k-1}(i, j) \leq D_{k-1}(i, k) + D_{k-1}(k, j), \ i \neq j \\ -1 & i = j \end{cases}$$
(5)

当距离矩阵 D 遍历完成的同时,路由矩阵也完成了所有节点的更新,27 个节点遍历完成得到最终的路由矩阵,如附录中式 A.3 所示。

从路由矩阵 P_{27} 中可以清楚地看出任意 2 种构 型转换经过的中间构型,例如构型"C2"转换到构型 "C6",第 2 行第 6 列为构型"C3",表示先经过构型 "C3",即构型"C2"→构型"C3";构型"C3"转换到 构型"C6",第 3 行第 6 列为构型"C5",表示再经过 构型"C5",即构型"C2"→构型"C3"→构型"C5"; 构型"C5"转换到构型"C6",第 5 行第 6 列是 – 1,表 示构型"C5"转换到构型"C6"直接连接,因此,构型 "C2"转换到构型"C6"的最短路径为"C2→C3→C5 →C6",需要3个步数。因此,对于任意一个具有 n 个构型的网络图,可以通过 Floyd 算法求出任意 2 种构型之间转换的最短路径。这对后续变形机器人 构型的研究具有一定意义。

2.2 运动控制

机器人的控制系统如图3所示,构型转换算法 如图4所示。考虑到机器人的尺寸与成本,该机器 人的运动采用脉冲宽度调制 (pulse width modulation,PWM)控制,构型转换通过控制器局域网(controller area network, CAN) 总线对其控制。CAN 总线 有以下优点:CAN 总线的数据传输速度快,理论峰 值能够达到1 Mbps,具有很高的数据通讯即时性; CAN 总线的最远数据传输距离为 10 km:一条 CAN 总线就可以同时连接128个节点,对于空间有限的 机器人来说特别有利:CAN 总线的抗干扰能力强, 不会轻易出问题。该可变形模块化机器人共有14 个伺服电机,主模块(main module,MM)的驱动有2 个驱动电机,每个副模块(M1、M2、M3、M4)的驱动 各有一个驱动电机,整个机器人的驱动由6个伺服 电机控制。每个副模块都拥有一个控制偏航运动和 俯仰运动的伺服电机,该机器人共有8个伺服电机 控制副模块的俯仰/偏航运动。CAN 总线采用闭环

方式,使其传输速率最大,CAN 总线上有 8 个 CAN 节点,分别连接 8 个伺服电机的控制器,控制副模块 的俯仰/偏航运动,该机器人的控制系统如图 3 所 示。可变形模块化机器人的构型转换流程如图 4 所 示,图中 $\theta_{Y1} = 1$ 表示副模块 M1 俯仰关节打开, θ_{p1} = 1 表示模块 1 的偏航关节打开; $\theta_{Y2} = 1$ 表示副模 块 M2 俯仰关节打开, $\theta_{p2} = 1$ 表示模块 M2 的偏航 关节打开; $\theta_{Y3} = 1$ 表示副模块 M3 俯仰关节打开, $\theta_{p3} = 1$ 表示模块 M3 的偏航关节打开; $\theta_{Y4} = 1$ 表示 副模块 M4 俯仰关节打开, $\theta_{p4} = 1$ 表示模块 M4 的 偏航关节打开,否则关节处于初始状态(即没有打 开)。

3 实验与结果

本节讨论可变形模块化履带机器人构型之间的 相互变换和越障实验,通过上位机控制机器人,控制 界面如图 5 所示。测试 27 种构型之间的相互转换, 验证机器人通过改变构型跨越障碍。构型之间转换 的最短路径由路由矩阵 **P**₂₇ 得知。实验开始时,变 构型机器人处于初始构型(即:构型0),上位机通过 发送构型X指令,变构型机器人自动通过最短路径



图 3 可变形模块化履带机器人的控制系统



图 4 可变形模块化履带机器人构型转换算法



图 5 可变形模块化机器人控制界面

转换到目标 X 构型。当变构型机器人不是处于初 始构型时,即机器人当前处于 Y 构型,上位机同样 可以发送构型 Z 指令,变构型机器人自动通过最短 路径转换到 Z 构型。

下面通过实际构型变换来验证实验结论。

实验1:变构型机器人由构型"C1"转换为构型 "C27",如图 6 所示,机器人通过的最短路径为 "C1"→"C2"→"C3"→"C5"→"C6"→"C14"→ "C20"→"C26"→"C27"。

实验2:变构型机器人由构型"C24"转换到构型 "C6",如图7所示,机器人通过的最短路径为 "C24"→"C17"→"C11"→"C5"→"C6"。

可变形模块化履带机器人越障实验如图 8 和 图 9所示,图 8 为变构型履带机器人的构型"C4"跨 越障碍物,图9为变构型履带机器人的构型"C27"



图 6 构型"C1"转换到构型"C27"



图 7 构型"C24"转换到构型"C6"



图 8 机器人跨越障碍物



图9 机器人穿越窄缝

穿越窄缝实验。

4 结论

本文介绍了一种可变形模块化履带机器人,该 机器人以模块化设计,具有 27 种构型,可以根据地 理环境与任务需要改变自身构型。主要结论如下。

(1)建立构型网络图,构型与构型之间为双向 连接方式,将每一种构型定义为图中的一个节点,利 用 Floyd 算法,引入距离矩阵与路由矩阵,通过对距 离矩阵和路由矩阵的迭代计算,最终得出任意 2 种 构型之间转换的最短路径和经过的中间构型。

(2)该型机器人能够通过最短路径实现 27 种构型之间任意 2 种构型的相互转换。并且随着机器 人自身周围环境的改变,机器人可以通过改变自身 构型,应对周围复杂多变的环境,顺利跨越障碍,完 成任务。

下一步研究将尝试实现机器人能够感知外部环

境的变化并自主改变构型,实现更强大的可变形模 块化履带机器人。

参考文献

- [1]陈亮,石胜,赵仁佳,等.隧道救援用履带式机器人设 计及越障性能分析[J]. 医疗卫生装备,2021,42 (12):17-22.
- [2] PRIYANKA M A S, JOY K R. The search and rescue robots in disaster management: a survey [J]. Critical Review, 2020,7(6):1059-1069.
- [3] 王亚翔, 刘满禄, 张俊俊,等. 履带机器人越沟壑性能 分析[J]. 机械设计与制造, 2020(7):255-259.
- [4] RAJPAR A H, ELADWI A E, ALI I, et al. Reconfigurable articulated robot using Android mobile device [J]. Journal of Robotics, 2021, 2021:1-8.
- [5] GUL F, MIR I, RAHIMAN W, et al. Novel implementation of multi-robot space exploration utilizing coordinated multi-robot exploration and frequency modified whale optimization algorithm [J]. IEEE Access, 2021,9:22774-22787.
- [6] ISAKA K, TSUMURA K; WATANABE T, et al. Development of underwater drilling robot based on earthworm locomotion[J]. IEEE Access, 2019,7:103127-103141.
- [7]张运修,张奇峰,杨宝林,等. 深海小型履带式机器
 人转向动力学建模与分析[J].海洋技术学报,2020, 39(2):22-31.
- [8] KLEINER A, HEINTZ F, TADOKORO S. Editorial: special issue on safety, security, and rescue robotics (SSRR), part 1[J]. Journal of Field Robotics, 2016,33 (3):263-264.
- [9] KLEINER A, HEINTZ F, TADOKORO S. Editorial: special issue on safety, security, and rescue robotics (SSRR), part 2[J]. Journal of Field Robotics, 2016, 33(3):1-5.
- [10] LIU J G, MA S G, WANG Y C, et al. Network-based reconfiguration routes for a self-reconfigurable robot [J]. Science in China(Series F: Information Sciences), 2008 (10):1532-1546.
- [11] LI B, MA S, LIU J, et al. AMOEBA-I: a shape-shifting modular robot for urban search and rescue[J]. Advanced Robotics, 2009,23(9):1057-1083.
- [12] 王田苗, 邹丹, 陈殿生. 可重构履带机器人的机构设 计与控制方法实现[J]. 北京航空航天大学学报,

— 297 —

2005,31(7):705-708.

- [13] 李楠, 王明辉, 马书根, 等. 基于多目标遗传算法的 水陆两栖可变形机器人结构参数设计方法[J]. 机械 工程学报, 2012,48(17):10-20.
- [14] LI N, MA S, LI B, et al. An online stair-climbing control method for a transformable tracked robot [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saint Paul, USA; IEEE, 2012;923-929.
- [15] HAGIWARA T, YAMAMURA Y, NAMIMA Y, et al.

Production of crawler robot with sub crawler and verification of traversing ability [C] // 2021 2nd International Symposium on Instrumentation, Control, Artificial Intelligence, and Robotics. Bangkok, Thailand: IEEE, 2021: 1-4.

[16] HONG S, WU M, XIAO J, et al. Kylin: a transformable track-wheel hybrid robot [C] // Proceedings of the 2017 International Conference on Advanced Mechatronic Systems. Xiamen, China: IEEE, 2018:7-12.

Principle and verification of configuration transformation of modularization shape-shiftable cybertracked

ZHANG Zhaoxiang***, FENG Jingkai*******, LIU Jinguo******, ZHANG Rongpeng******

(* College of Information Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142)

(** Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

(**** University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(**** Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169)

Abstract

In order to realize that robots can overcome obstacles and complete tasks by changing their configurations in different environments, it is necessary to study the transformation between configurations of modularization shape-shiftable cybertracker. The robot has 27 configurations forming a configuration network, each of which is defined as a node in the weighted oriented configuration network. The conversion from one configuration to another is represented by a directed path with a non-negative weight, all of which have a weight of 1. By using Floyd algorithm, the shortest number of steps and the intermediate configuration between any two configurations are obtained by iterative calculation of distance matrix and routing matrix. The results of the conversion between 27 different configurations of the variable configuration modular tracked robot and the response of different configurations to different environments are given through the real experiments. The experimental results show that the robot can realize the mutual conversion between configurations through the shortest path, and with the different environment, the robot can realize the mutual conversion between configuration to successfully overcome obstacles and complete tasks.

Key words: modularization, shape-shiftable, cybertracker, transformation between configuration

附录:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	00	1	8	8	00	8	8	00	8	8	8	∞	8	∞	00	00	8	8	∞	∞	∞	8	8	8	00	8	∞)
2	1	∞	1	1	∞	∞	1	00	8	∞	00	∞	∞	∞	00	∞	∞	00	∞	00	∞	∞	8	∞	00	∞	∞
3	∞	1	8	∞	1	∞	8	1	00	8	∞	8	∞	∞	∞	∞	00	00	8	∞	8	8	8	00	8	8	∞
4	∞	1	∞	8	1	∞	8	∞	8	1	∞	∞	∞	00	00	∞	∞	∞	8	00	∞	∞	8	∞	∞	8	∞
5	∞	8	1	1	∞	1	8	8	00	8	1	∞	∞	∞	00	∞	8	8	∞	00	∞	∞	8	00	∞	8	∞
6	x	8	8	∞	1	∞	∞	00	8	8	∞	∞	∞	1	00	x	×	00	∞	00	∞	∞	8	×	00	8	∞
7	∞	1	8	∞	∞	∞	∞	1	∞	1	∞	∞	∞	∞	∞	8	∞	8	∞	8	∞	∞	8	∞	8	∞	∞
8	∞	8	1	∞	∞	8	1	00	8	∞	1	∞	∞	∞	1	∞	∞	00	∞	8	8	8	8	8	8	8	∞
9	∞	00	∞	00	∞	∞	∞	00	00	1	00	1	∞	∞	00	∞	∞	00	∞	00	∞	∞	∞	00	00	∞	∞
10	∞	∞	∞	1	∞	∞	1	00	1	∞	1	∞	1	∞	00	1	∞	00	∞	00	1	∞	8	00	00	∞	∞
11	∞	8	∞	∞	1	∞	∞	1	∞	1	∞	∞	∞	1	00	∞	1	∞	∞	8	∞	1	∞	∞	∞	∞	∞
12	∞	00	∞	∞	∞	∞	∞	∞	1	∞	∞	∞	1	∞	∞	∞	∞	1	∞	8	∞	∞	∞	00	∞	∞	∞
13	∞	00	∞	8	∞	∞	8	00	00	1	8	1	∞	1	00	∞	∞	00	1	00	8	∞	8	00	00	8	∞
$D_{0} = 14$	∞	00	∞	00	∞	1	∞	00	8	8	1	8	1	∞	00	∞	8	00	8	1	∞	∞	1	8	00	8	∞
15	x	00	00	∞	00	8	8	1	00	00	00	∞	8	∞	00	00	1	8	8	00	8	8	00	00	8	∞	∞
16	∞	8	∞	∞	∞	∞	∞	∞	8	1	∞	∞	∞	∞	∞	∞	1	8	1	8	∞						
17	x	00	8	∞	8	∞	8	00	00	8	1	8	∞	∞	1	1	8	8	∞	1	∞	∞	8	1	8	8	∞
18	x	00	8	00	8	8	8	00	8	8	00	00	1	8	00	8 S	8	00	1	00	8	8	00	00	00	8	∞
19	x	00	8	00	8	8	8	00	8	8	00	00	1	8	8	1	8	1	8	1	8	8	00	8	1	00	∞
20	x	00	8	00	∞	∞	8	00	8	8	8	8	8	1	00	8	1	00	1	00	8	∞	8	00	00	1	∞
21	x	8	8	∞	8	∞	8	∞	8	1	∞	∞	∞	∞	8	∞	8	8	∞	00	∞	1	∞	8	8	8	∞
22	x	00	∞	8	8	∞	8	∞	8	8	1	8	∞	8	8	8	8	8	8	8	1	∞	1	1	8	8	∞
23	x	00	8	8	8	8	8	00	00	8	8	8	∞	1	00	8	8	8	00	00	8	1	8	00	00	1	∞
24	8	00	00	00	00	8	8	00	00	8	00	8	8	∞	00	00	1	00	00	00	8	1	8	00	00	1	∞
25	x	00	8	∞	∞	∞	8	8	00	∞	8	∞	∞	∞	00	00	∞	8	1	00	∞	∞	8	00	00	1	∞
26	∞	00	8	00	00	8	∞	8	00	00	00	00	00	00	00	00	00	8	00	1	00	00	1	1	1	00	1
27	(∞)	00	∞	00	∞	00	∞	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	8	8	00	00	00	00	00	1	∞
																										(A.1)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	(∞)	1	2	2	3	4	2	3	4	3	4	5	4	5	4	4	5	6	5	6	4	5	6	6	6	7	8)
2	1	x	1	1	2	3	1	2	3	2	3	4	3	4	3	3	4	5	4	5	3	4	5	5	5	6	7
3	2	1	8	2	1	2	2	1	4	3	2	5	4	3	2	4	3	6	5	4	4	3	4	4	6	5	6
4	2	1	2	8	1	2	2	3	2	1	2	3	2	3	4	2	3	4	3	4	2	3	4	4	4	5	6
5	3	2	1	1	∞	1	3	2	3	2	1	4	3	2	3	3	2	5	4	3	3	2	3	3	5	4	5
6	4	3	2	2	1	∞	4	3	4	3	2	3	2	1	4	4	3	4	3	2	4	3	2	4	4	3	4
7	2	1	2	2	3	4	x	1	2	1	2	3	2	3	2	2	3	4	3	4	2	3	4	4	4	5	6
8	3	2	1	3	2	3	1	∞	3	2	1	4	3	2	1	3	2	5	4	3	3	2	3	3	5	4	5
9	4	3	4	2	3	4	2	3	∞	1	2	1	2	3	4	2	3	2	3	4	2	3	4	4	4	5	6
10	3	2	3	1	2	3	1	2	1	∞	1	2	1	2	3	1	2	3	2	3	1	2	3	3	3	4	5
11	4	3	2	2	1	2	2	1	2	1	∞	3	2	1	2	2	1	4	3	2	2	1	2	2	4	3	4
12	5	4	5	3	4	3	3	4	1	2	3	∞	1	2	5	3	4	1	2	3	3	4	3	5	3	4	5
13	4	3	4	2	3	2	2	3	2	1	2	1	∞	1	4	2	3	2	1	2	2	3	2	4	2	3	4
$D_{27} = 14$	5	4	3	3	2	1	3	2	3	2	1	2	1	x	3	3	2	3	2	1	3	2	1	3	3	2	3
15	4	3	2	4	3	4	2	1	4	3	2	5	4	3	8	2	1	4	3	2	4	3	4	2	4	3	4
16	4	3	4	2	3	4	2	3	2	1	2	3	2	3	2	∞	1	2	1	2	2	3	4	2	2	3	4
17	5	4	3	3	2	3	3	2	3	2	1	4	3	2	1	1	8	3	2	1	3	2	3	1	3	2	3
18	6	5	6	4	5	4	4	5	2	3	4	1	2	3	4	2	3	8	1	2	4	5	4	4	2	3	4
19	5	4	5	3	4	3	3	4	3	2	3	2	1	2	3	1	2	1	00	1	3	4	3	3	1	2	3
20	6	5	4	4	3	2	4	3	4	3	2	3	2	1	2	2	1	2	1	8	4	3	2	2	2	1	2
21	4	3	4	2	3	4	2	3	2	1	2	3	2	3	4	2	3	4	3	4	8	1	2	2	4	3	4
22	5	4	3	3	2	3	3	2	3	2	1	4	3	2	3	3	2	5	4	3	1	8	1	1	3	2	3
23	6	5	4	4	3	2	4	3	4	3	2	3	2	1	4	4	3	4	3	2	2	1	8	2	2	1	2
24	6	5	4	4	3	4	4	3	4	3	2	5	4	3	2	2	1	4	3	2	2	1	2	8	2	1	2
25	6	5	6	4	5	4	4	5	4	3	4	3	2	3	4	2	3	2	1	2	4	3	2	2	8	1	2
26	7	6	5	5	4	3	5	4	5	4	3	4	3	2	3	3	2	3	2	1	3	2	1	1	1	∞	1
27	(8	1	6	6	2	4	0	3	6	5	4	5	4	3	4	4	3	4	3	2	4	5	2	2	2	1 (.	(∞) A.2)

张兆详等:可变形模块化履带机器人构型转换原理与验证

1	1	2 -1	3 C2	4 C2	5 C2	6 C2	7 C2	8 C2	9 C2	10 C2	11 C2	12 c2	13 c2	14 c2	15 C2	16 C2	17 ^{C2}	18 C2	19 C2	20 C2	21 c2	22 c2	23 c2	24 c2	25 c2	26 ^{C2}	27 ^{C2}
2	-1	-1	-1	-1	С3	С3	-1	С3	C 4	C 4	СЗ	С4	С4	С3	С3	С4	С3	С4	С4	С3	С4	С3	С3	С3	C4	С3	С3
3	C 2	-1	-1	C 2	-1	C 5	C 2	-1	C2	C2	C5	C2	C 2	С5	C 8	C2	C5	C2	C2	C5	C2	C 5	C 5	С5	C2	C5	С5
4	C2	-1	C2	-1	-1	C 5	C2	C 2	C10	-1	C5	C10	C10	C 5	C2	C10	C 5	C 8	C 8	C 5	C10	C 5	C 5	С5	C10	C 5	С5
5	С3	<i>C</i> 3	-1	-1	-1	-1	C3	C3	C 4	C 4	-1	C 4	C 4	C6	С3	C 4	C11	C 4	C 4	C 6	C4	C11	C 6	C11	C4	C 6	<i>C</i> 6
6	C 5	C 5	C5	С5	-1	-1	C 5	C5	С5	C 5	C5	C14	C14	C14	С5	C5	С5	C14	C14	C14	С5	С5	C14	С5	C14	C14	C14
7	C 2	-1	C 2	C 2	C2	C2	-1	-1	C 10	-1	C8	C10	C10	C 8	C 8	C10	C 8	C10	C10	C 8	C10	C8	C 8	C 8	C10	C8	C 8
8	С3	<i>C</i> 3	-1	С3	С3	С3	-1	-1	С7	C7	-1	С7	С7	C11	-1	C7	C11	С7	С7	C11	C7	C11	C11	C11	C7	C11	C11
9	C10	C10	C10	C10	C10	C10	C10	C10	-1	-1	C10	-1	C10	C10	C10	C10	C10	C12	C10	C10							
10) C4	C4	C 4	-1	<i>C</i> 4	C4	C7	C7	-1	-1	-1	C9	-1	C11	C7	-1	C11	C9	C13	C11	-1	C11	C11	C11	C13	C11	C11
1	C5	C5	C5	С5	-1	C 5	C8	-1	C10	-1	-1	C10	C10	-1	C 8	C10	-1	C10	C10	C14	C10	-1	C14	C17	C10	C14	C14
12	2 C9	<i>C</i> 9	C9	<i>C</i> 9	C9	C13	C9	C9	-1	C9	C9	-1	-1	C13	C9	C9	C9	-1	C13	C13	С9	C9	C13	C9	C13	C13	C13
1.	3 C10	C10	C10	C10	C10	C14	C10	C10	C10	-1	C10	-1	-1	-1	C10	C10	C10	C12	-1	C14	C10	C10	C14	C10	C19	C14	C14
$P_{27} = 14$	4 C6	<i>C</i> 6	C 6	C 6	C6	-1	C11	C11	C11	C11	-1	C13	-1	-1	C11	C11	C11	C13	C13	-1	C11	C11	-1	C11	C13	C 20	C 20
1:	5 C8	C8	C 8	C 8	C 8	C8	C8	-1	C 8	C8	C8	C 8	C 8	C8	-1	C17	-1	C17	C17	C17	C8	C8	C 8	C17	C17	C17	C17
1	5 C10	C10	C10	C10	C10	C10	C10	C10	C10	-1	C10	C10	C10	C10	C17	-1	-1	C19	-1	C17	C10	C10	C10	C17	C19	C17	C17
1′	7 сп	C11	C11	C11	C11	C11	C11	C11	C11	C11	-1	C11	C11	C11	-1	-1	-1	C16	C16	-1	C11	C11	C11	-1	C16	C 20	C 20
1	B C12	C12	C12	C12	C12	C12	C12	C12	C12	C12	C12	-1	C12	C12	C19	C19	C19	-1	-1	C19	C12	C12	C12	C19	C19	C19	C 19
19	с13	C13	C13	C13	C13	C13	C13	C13	C13	C13	C13	C13	-1	C13	C16	-1	C16	-1	-1	-1	C13	C13	C13	C16	-1	C 20	C 20
2	C14	C14	C14	C14	C14	C14	C14	C14	C14	C14	C14	C14	C14	-1	C17	C17	-1	C19	-1	-1	C14	C14	C14	C17	C19	-1	C 26
2	1 C10	C10	C10	C10	C10	C10	C10	C10	C10	-1	C10	C10	C10	C10	-1	-1	C 22	C 22	C10	C 22	C 22						
2	2 C11	C11	C11	C11	C11	C11	C11	C11	C11	C11	-1	C11	C11	C11	C11	C11	C11	C11	C11	C11	-1	-1	-1	-1	C 23	C 23	C 23
2	3 C14	C14	C14	C14	C14	C14	C14	C14	C14	C14	C14	C14	C14	-1	C14	C14	C14	C14	C14	C14	C 22	-1	-1	C 22	C 26	-1	C 26
2	4 C17	C17	C17	C17	C17	C17	C17	C17	C17	C17	C17	C17	C17	C17	C17	C17	-1	C17	C17	C17	C 22	-1	C 22	-1	C 26	-1	C 26
2	5 C19	C19	C 19	C19	C19	C19	C19	C 19	C19	C19	C19	C19	C19	C19	C19	C19	C19	C19	-1	C19	C 19	C 26	C 26	C 26	-1	-1	C 26
2	5 C 20	C 20	C 20	C 20	C 20	C 20	C 20	C 20	C 20	C 20	C 20	C 20	C 20	C 20	C 20	C 20	C 20	C 20	C 20	-1	C 22	C 22	-1	-1	-1	-1	-1
2	7 (C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	C 26	с26 (А	^{c26} , .3)