

模块化机器人的双输出 CPG 网络调相运动控制

崔馨丹, 朱延河, 王晓露, 唐术锋, 赵 杰

(哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 150080 哈尔滨,)

摘 要: 为了增强模块化机器人的灵活性, 以及对其多模式运动进行更简单有效地控制, 结合阵列式和串联式自重构机器人的特点, 设计基于万向式关节的双自由度 UBot 模块, 并根据两个关节之间的相互抑制关系, 结合生物学的中枢模式发生器 (CPG) 运动控制原理, 设计具有双输出的 CPG 网络调相运动控制器. 通过调整 CPG 间的连接权重以及每个 CPG 中两组输出的关系, 调解运动控制信号间的相位差值, 有效地控制 UBot 模块化机器人的整体协调运动. 应用这种控制方法控制了模块化机器人的 3 种运动模式: 四足运动、蠕动和多节虫运动, 在 ADAMS 仿真环境下进行了运动仿真实验, 并在 UBot 模块化自重构平台上分别进行了 3 种构型的实体运动试验. 实验结果验证了双输出 CPG 调相网络对模块化机器人运动控制的有效性和实用性.

关键词: 模块化机器人; 自重构; 中枢模式发生器 (CPG); 运动控制; UBot

中图分类号: TP242. 6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367 - 6234(2013)07 - 0047 - 06

Two-output CPG phased network locomotion control for modular robot

CUI Xindan, ZHU Yanhe, WANG Xiaolu, TANG Shufeng, ZHAO Jie

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: The modular robot has the characteristic of diversity configuration and multi-mode locomotion. To make the robot more flexible and the control of multi-mode locomotion easier, combined with the feature of lattice and chain type self-reconfigurable robots, the UBot module based on the universal joint has been developed. According to the mutual inhibition relation of two joints in each module, combined with biological central pattern generator (CPG) principle, the CPG controller with two outputs has been designed. The two-output CPG controller can control the UBot robot's locomotion effectively by adjusting the connective weights among CPGs and two outputs' relation in each CPG and getting different phases. The control method has been used to control three motions: quadruped motion, squirm motion and multi-segmented worm motion. The simulation has been successfully done in ADAMS, besides, the experiment of the three motions have been done on the UBot modular robotic platform. The experiment results have proved the Two-output CPG phased network for modular robot locomotion control to be practical and effective.

Key words: modular robot; self-reconfiguration; central pattern generator (CPG); locomotion control; UBot

模块化自重构机器人^[1-3]由一种或多种功能相同或相异的模块组成, 各模块具有标准的机械、电气接口, 可以自主地变化构型和功能以适应不同的环境和任务需求. 这一特性使其可以自主地适应外部环境, 并通过用闲置模块替换故障模块实现自

修复功能. 同时, 模块中的驱动不仅能够实现自修复, 还能通过配合产生整体构型的运动. 由于其适应性强, 灵活度高等特点, 国内外许多学者开始了模块化自重构机器人^[4-6]的研究. 模块化机器人的两个重要研究问题是构型重构问题和构型运动问题. 本文将重点研究模块化自重构机器人的运动问题. 目前, 主要有两种运动方式. 一种是通过不停地重构过程, 重复将尾部模块传递到头部最后达到整体构型的向前移动^[7-8]; 另一种方法是通过协调控制每个模块关节的转动关系, 实现机器人构型整体

收稿日期: 2012 - 07 - 10.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60705027; 61273316).
作者简介: 崔馨丹 (1985—), 女, 博士研究生;
赵 杰 (1968—), 男, 教授, 博士生导师.
通信作者: 朱延河, yhzhu@hit.edu.cn.

的协调运动^[9-10]. 前一种运动方式运动速度比较慢, 运动过程繁琐, 比较适用于通过某些特定环境或难以翻越的障碍; 后一种运动方式适用于整体构型(如四足构型、蠕虫构型等)的快速运动. 一般情况下, 对机器人运动速度要求是非常重要的, 如抢险搜救等, 而通过循环的重构过程实现运动很难达到这种要求, 因此, 本文主要针对构型的整体协调运动控制方法进行研究.

模块化自重构机器人的构型具有多样性的特点, 以往的控制方法是针对不同的构型、不同模块数量创建针对各个模块的运动序列, 控制整体构型的整体协调运动. 这种控制方法比较复杂, 且需要大量的存储空间来存储控制指令. 本文采用仿生学中的中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)原理, 由于神经元之间通过相互连接、抑制会产生相位互锁的自激振荡, 对于不同的运动构型, 不需要对整个控制系统重新建模, 只需根据模块连接方式的不同调整神经元之间的连接状态, 得到不同相位时序的数值控制信号, 从而得到针对不同构型的运动控制序列, 适应模块化自重构机器人构型多变性及运动方式多样性的需要. 针对所研制的 UBot 模块万向式关节两个自由度相互抑制关系, 建立了具有双输出的 CPG 步态生成控制器, 通过控制信号间相位的调节解决基于万向式关节模块的运动控制问题.

1 UBot 模块运动特点

综合阵列式自重构机器人模块形状规则, 容易形成整齐的空间栅格阵列的特点以及串联式机器人模块关节灵活、连接紧密的特点, 设计了如图 1 所示的 UBot 模块^[6,11], 该模块是由 2 个 L 形半块通过一个直角轴连接而成的正方体结构模块. 每个模块有两个互相垂直的旋转自由度和 4 个可实现与相邻模块自动连接、断开的连接面. 根据连接面的不同分为具有钩爪连接面的主动模块和具有孔洞连接面的被动模块. 模块自带电池, 连接面具有自锁及定位功能.

基于万向式关节的 UBot 模块, 两个关节角度分别由 $J00$ 和 $J10$ 表示, 如图 2 所示. 如果不考虑两个转动轴之间的干涉, 两个转动自由度的运动范围是 -90° 到 90° , 以 0° 为中心转动. 而由于模块特性的限制, 模块的两个关节在运动中会发生干涉, 即任何情况下两个构件不能同时从零位转向模块的同侧, 即两个关节角 $J10$ 与 $J00$ 需满足:

$$J10 \times J00 \geq 0. \quad (1)$$



(a) 主动模块



(b) 被动模块

图 1 UBot 模块

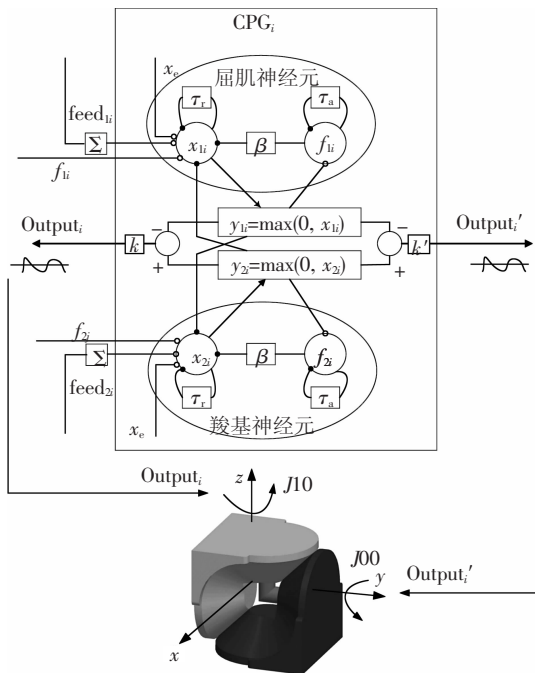


图 2 UBot 模块结构图及其 CPG 控制模型(一个 CPG 由两个神经元构成, 并得到两组输出分别控制模块中的两个关节)

如果两个关节同时转动, 为避免两构件干涉导致的模块损坏, 所提供的关节旋转信号必须遵循式(1)的原则, 即两个关节相对于 0 点的转动周期是相同的, 且必须同时经过零位并转向模块的两侧才能避免干涉.

因此模块运动分为两种情况: 1). 模块只有一个关节转动, 另一个关节在零位不动; 2). 两个关节同时转动, 但只能在模块的两侧转动, 并且过零位的时刻要相同.

2 双输出 CPG 模型及其控制原理

机器人生物步态是利用生物神经控制机理而产生的一种相位互锁的自激振荡的多肢体运动模式. 本文以 Matsuoka 提出的 CPG 微分振荡器模型^[12-13]为基础, 建立了如式(2)、(3)所示的控制关节运动的 CPG 控制器, 如图 2 所示.

$$\begin{cases} T_r \dot{x}_{1i} + x_{1i} = -\omega_0 y_{2i} - \beta f_{1i} + x_e + F_{1i} + a \cdot \sum_j w_{ij} x_{1j}, \\ T_a \dot{f}_{1i} + f_{1i} = y_{1i}, \\ y_{1i} = \max(0, x_{1i}), i = 0, \dots, n-1; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} T_r \dot{x}_{2i} + x_{2i} = -\omega_0 y_{1i} - \beta f_{2i} + x_e + F_{2i} + a \cdot \sum_j w_{ij} x_{2j}, \\ T_a \dot{f}_{2i} + f_{2i} = y_{2i}, \\ y_{2i} = \max(0, x_{2i}), i = 0, \dots, n-1. \end{cases} \quad (3)$$

根据 UBot 模块两个关节的相互抑制关系,调节输出状态的系数,应用一组 CPG 控制单元得到如式(4)所示的两组输出信号来控制 UBot 模块的两个互相抑制的关节运动:

$$\begin{cases} O_{\text{Output}_i} = -m_1 y_{1i} + m_2 y_{2i}, \\ O_{\text{Output}_i'} = -m_1' y_{1i} + m_2' y_{2i}. \end{cases} \quad (4)$$

其中式(2)、(3)分别对应了一个 CPG 中的屈肌神经元及伸肌神经元, n 表示整个振荡网络中 CPG 的数目即构型中参与运动模块的数目, x_{1i} 和 x_{2i} 代表神经元内部状态, f_{1i} 和 f_{2i} 表示神经元的疲劳程度, y_{1i} 和 y_{2i} 分别为一个 CPG 振荡器中两个神经元的输出, x_e 是外部输入的一个常量, β 为适应系数, ω_0 是屈肌神经元和伸肌神经元之间的连接系数. 如果没有等号右侧后两项,式(2)、(3)代表了一个自激振荡器,而 T_r 和 T_a 分别为振荡器的上升时间常数和适应时间常数,这两个常数越大,振荡器的周期就越长. 根据文献^[14],如果 T_a/T_r 是常数,那么该振荡器的固有频率正比于 $1/T_r$;同时,振荡器的振幅也正比于外部输入 x_e ^[8]. 变量 F_{1i} , F_{2i} 分别代表了所控制的关节自身状态对 CPG 的反馈,本文由于关节上没有加入传感器,不能得到关节自身状态的信号,忽略此项,即 $F_{1i} = F_{2i} = 0$. a 为振荡器之间的抑制系数, w_{ij} 是模块 i 和模块 j 之间的连接权重, $\mathbf{w} = (w_{ij})$ 代表 CPG 振荡器之间的连接矩阵.

每个 CPG 振荡器能够输出两组控制信号,如式(4)所示的节律振荡信号,其中信号处理系数需满足式(5)或式(6):

$$m_1' = 0 \text{ 或 } m_2' = 0, (m_1' \cdot m_2' = 0), \quad (5)$$

$$m_1/m_2 = m_1'/m_2', (m_1' \cdot m_2' \neq 0). \quad (6)$$

即一个关节在零位不动,另一个关节任意转动,相对于式(5);两个关节同时转动,对应式(6),两个关节均由节律的周期振荡信号控制,振荡信号频率及振荡方向相同,且同时经过零位.

在综合考虑模块的机械性质如最大转角、最大

转速等条件下,通过试凑法得到模型中的参数,设置为: $T_r = 0.05$; $T_a = 0.4$; $\beta = 2$; $a = 1$; $\omega_0 = 1$; $x_e = 0.25$, $m_1 = m_2 = 1$. 这些参数在以下3种运动方式的控制中都是固定不变的. 通过 Runge-Kutta 计算方法,可以得到 CPG 网络的动态计算结果.

下面讨论 CPG 网络中不同的连接矩阵对整个振荡器输出的影响. 对于 CPG 之间的连接有3种方式:激励连接“1”,抑制连接“-1”,以及无连接状态“0”.

图3所示为3种连接状态下 CPG 间的输出:

1) 当两个 CPG 神经元为激励连接时,两组振荡输出之间的相位差无论初值如何,均收敛于0;

2) 当两个 CPG 神经元为抑制连接时,相位差收敛于1/2个周期;

3) 当4个神经元按照如图3所示的连接方式构成连接网络,即前3个神经元循环抑制,第4个神经元与循环网络中第3个 CPG 相互抑制时,前3个 CPG 输出的振荡曲线之间的相位差收敛于1/3个周期,而对于相互抑制的第3、第4神经元之间相位差仍为1/2个周期.

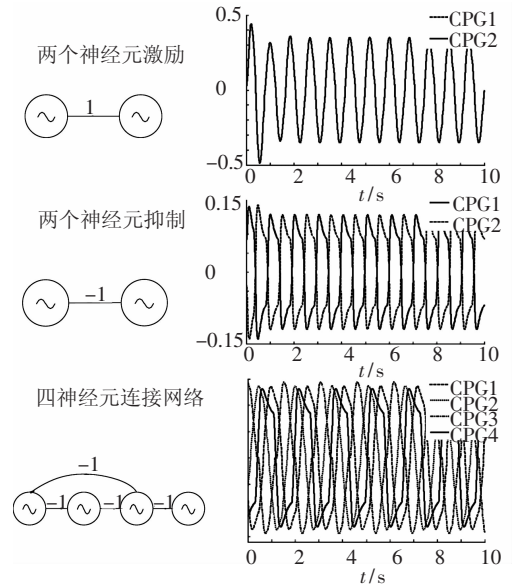


图3 不同连接方式对 CPG 数值输出的影响

同理参照文献[3],当 n 个 CPG 循环抑制时,各个相邻 CPG 的相位差为 $1/n$ 个周期. 因此,通过调整 CPG 神经元之间连接矩阵 $\mathbf{w}$,可以得到各个关节不同时序的耦合振荡,以控制不同构型的协调运动.

综上所述,这种双输出的 CPG 模型可以产生适用于双自由度的 UBot 万向式关节的运动控制信号. 而由这种双输出 CPG 模型构成的步态生成网络可以通过连接矩阵的调整,在不改变控制模型中的其它参数的情况下,调整输出信号的相

位差,自动产生不同时序的步态控制信号.整个步态控制信号生成过程,无需外在的同步信号参与,并且不受外界干扰的影响,使模块的运动具有鲁棒性.而CPG振荡器网络中,CPG之间个体独立,通过连接矩阵的不同而产生不同效果的振荡输出,这种工作方式与模块化机器人系统的运动机理相似,模块之间相互独立,通过连接方式的不同及各个模块关节的转动方式不同而产生不同模式的运动.因此,CPG运动控制方法适用于自重构机器人各模块的关节控制.

3 运动控制及仿真

模块化机器人的运动方式主要有两类:有肢体的行走运动方式(如四足、六足构型),以及无肢体的蠕动运动方式(如蠕虫构型、H构型).针对这两种运动方式,分别以四足构型和蠕虫构型为例,用上述的CPG控制方法,对两种构型进行运动控制仿真.并利用UBot模块双自由度的特点,进行多节虫模式运动的研究.

应用ADAMS软件环境,建立了由UBot^[6,11]模块构成的四足构型、蠕虫构型以及多节虫构型的仿真模型.并分别应用CPG控制方法进行运动控制仿真.

3.1 四足构型运动

四足构型是最基本的足式构型.本文所建立的四足构型由16个UBot模块构成,如图4所示,每条腿由3个模块构成,躯干模块由4个模块构成.根据四足构型的特点,模拟生物的运动方式,在向前运动的过程中躯干关节不动,而是通过4条腿的协调摆动,使整体构型向前移动.在单腿摆动的过程中,腿部的膝关节伴随着髋关节摆动的频率规律运动.因此只需控制好4个髋关节的摆动时序,就能协调整个四足构型的运动.采用4个CPG神经元分别控制四条腿髋关节的摆动,图4所示为4个CPG神经元的连接关系,其中“-1”表示神经元之间抑制连接,“1”表示神经元之间激励连接,LF、RF、LH、RH分别表示构型的左前、右前、左后、右后腿.

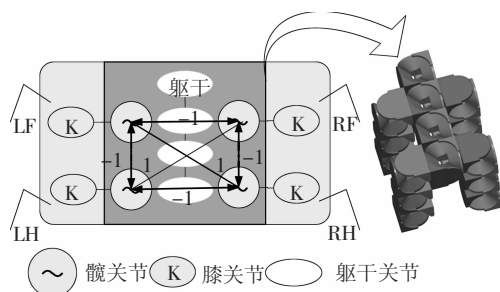


图4 CPG对四足构型的控制

以对角步态为例,4个CPG振荡器按如图4所示的连接方式构成了振荡器控制网络,控制4条腿的髋关节运动,其连接矩阵如式(7)所示:

$$w = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

根据上节所介绍的CPG数学模型及参数,得到如图5所示的四足运动的步态控制曲线.4条输出曲线很快达到稳定振荡,具有相应步态的相位关系.与传统规划控制方法输出曲线由人为设定不同,CPG模型的控制输出是通过神经元之间的耦合作用产生的.在ADAMS仿真环境下对这种对角行进步态进行了运动仿真,得到的仿真截图如图6所示.

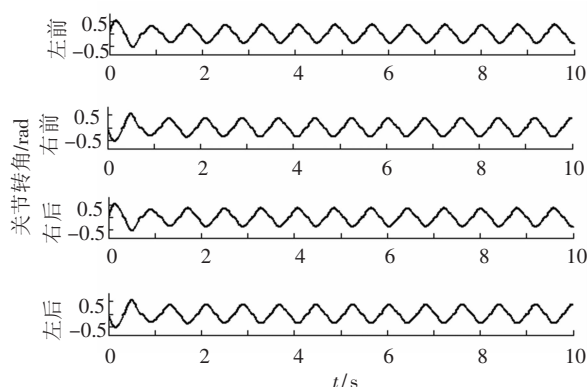


图5 对角步态 CPG 输出的关节弧度控制曲线



图6 四足运动仿真

对于四足构型的运动,还可以通过连接矩阵的调节,产生同侧腿成对起落、前后腿成对起落及各腿按1/4个周期的相位差依次起落等多种运动模式,这也体现了生物步态的多样性.

3.2 蠕虫构型

对于单链式构型,采用蠕虫构型生物运动的控制方法,各神经元之间的相位差由神经元之间的连接关系决定.通过调整神经元的循环抑制数目来控制机器人摆动的幅度.

以9个模块连接而成的单链式蠕虫构型为例,每个模块由一个CPG神经元控制,蠕虫构型及其对应的神经元之间的连接抑制关系如图7所示.图中“-1”表示神经元之间抑制连接.通过整体的依次单向抑制得到整体的协调运动次序,并通过3个模块间的循环抑制来控制各模块间的相位差值.而模块间的相位差值可以通过调节循环

抑制的子模块数目来控制。

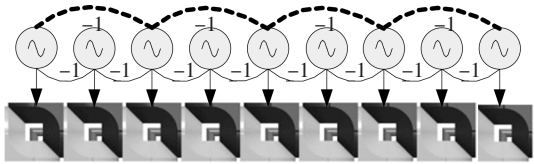


图 7 蠕虫构型运动的 CPG 连接方式及控制曲线
所采用的 CPG 神经元连接关系矩阵如式(8)
所示。

$$w = \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

通过 CPG 控制网络得到 9 条控制输出信号, 9 条节律振荡曲线依次具有均匀的相位差, 分别对应了构型中 9 个模块中的俯仰转动关节的旋转弧度, 通过 CPG 网络的控制, 能够使整体构型向前蠕动。在 Adams 环境下进行了蠕虫构型的运动仿真, 结果如图 8 所示。

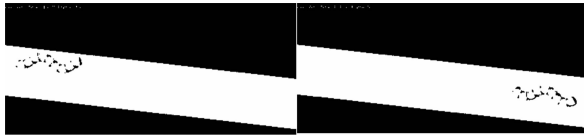


图 8 蠕虫运动仿真

3.3 多节虫运动

上述两种运动方式, UBot 模块仅有一个关节参加运动。本节在蠕虫构型蠕动的基础上, 引入模块的另一个关节转动, 进行如图 9 所示的仿多节虫运动模式的运动仿真。CPG 间的连接方式与蠕虫构型相同, 只是在输出参数上 CPG 采用了如式(6)所示的输出, 两组关节的波动频率保持一致。其中 $m'_1 = 1/3, m'_2 = 1/3$, 满足 $m_1/m_2 = m'_1/m'_2$ 。



图 9 多节虫运动仿真

由仿真结果可以看出, 通过偏航关节的转动使运动的速度减慢, 但是运动幅度大大降低, 且在向前蠕动的同时发生转弯, 可适用于狭小空间的运动及在运动中遇到障碍的避让。

4 UBot 模块化自重构系统及实验

为了验证 CPG 模型对模块化自重构机器人运动控制的有效性, 应用 UBot 模块化机器人系统平台进行了试验。分别用 UBot 模块组成的四足构型和蠕虫构型, 并应用上述 CPG 控制方法控制其运动。

图 10 为四足构型运动的录像截图。与仿真中所使用的四足构型相同, 四足构型共由 16 个 UBot 模块组成, 每条腿的中间模块按照仿真数据中的运动指令转动, 得到了如图 10 所示的对角行走步态, 15 s 向前运动约 500 mm, 运动过程平稳。

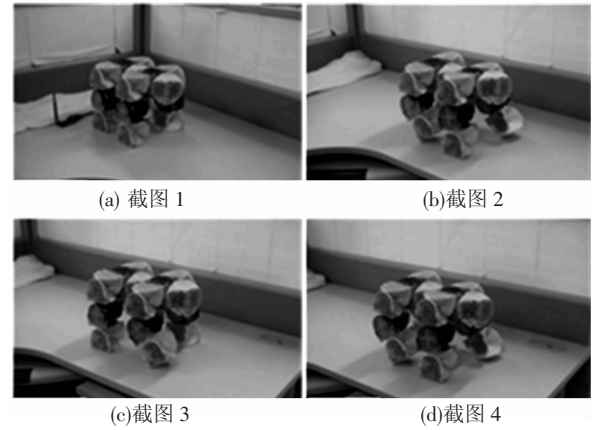


图 10 UBot 四足构型运动实验

在由 9 个模块连接而成的蠕虫构型上进行了运动实验, 如图 11 所示。该构型在 12 s 内向前运动了约 600 mm, 运动过程平稳流畅。

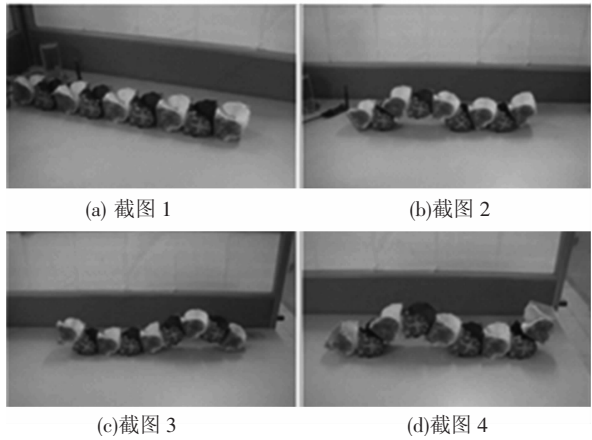


图 11 UBot 蠕虫构型运动实验

在蠕虫运动的基础上, 引入模块的第 2 个关节转动, 进行了 8 模块多节虫运动试验, 如图 12 所示, 与蠕虫运动相比, 这种两关节同时旋转的多节虫运动波动幅度明显降低, 且发生转弯, 对蠕虫构型在狭小空间中运动及避障转弯的控制中起到一定的借鉴作用。在 15 s 内构型转过了大约 30°, 同时向前移动了约 75 mm, 运动过程中机器人最大的振幅的最高点不超过模块的模块自身高度的 1.2 倍。

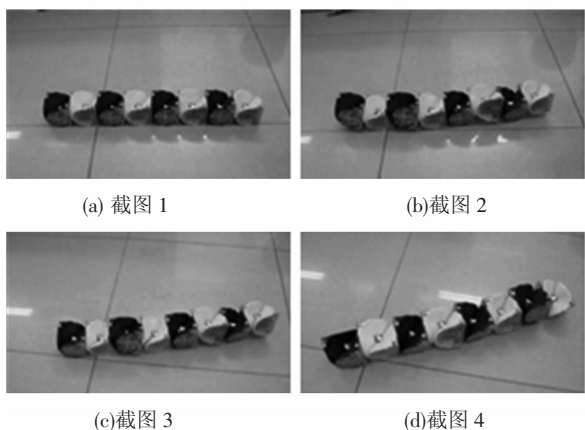


图 12 多节虫构型运动试验

实验结果表明,UBot 模块化机器人系统在双输出 CPG 控制网络的控制下实现了整体构型的协调运动,验证了 CPG 控制方法对模块化机器人的有效性。

由于 CPG 控制方法目前属于开环控制,对模块运动效果没有反馈,要得到比较好的运动效果,需要不断地对 CPG 参数进行修改,反复实验找到合适的运动控制参数,这样增加了系统工作量,并且对构型在运动中发生打滑、方向偏移、模块故障等现象不能得到实时有效地避免。以后的研究工作会增加传感器反馈项,实现 CPG 闭环控制,并利用神经元之间的耦合关系对运动信号相位的影响,结合优化及学习等计算方法,使系统可以通过不断地优化和学习,快速生成适用于任意给定构型的 CPG 运动控制网络。

5 结 论

1) 针对模块化机器人构型的多样性及模块运动方式复杂性的特点,提出了将中枢模式发生器(CPG)原理引入到模块化自重构机器人的运动控制当中的控制方法。

2) 针对 UBot 模块基于万向式关节的特点,设计了双输出的 CPG 运动控制器。根据模块连接方式的变化,通过调整 CPG 神经元之间的连接耦合关系,调整输出信号之间的相位差值,得到针对不同构型的运动控制输出,成功地控制了模块化机器人的运动。

3) 通过在 UBot 模块化机器人上进行的仿真及实验,验证了 CPG 控制方法的有效性。

参考文献

[1] ZYKOV V, MYTILINAIOS E, ADAMSAND B, *et al.* Self-reproducing machines: A set of modular robot cubes accomplish a feat fundamental to biological systems

[J]. *Nature*, 2005, 435(12): 163 – 164.

- [2] SPROEWITZ A, BILLARD A, DILLENBOURG P, *et al.* Roombots-Mechanical design of self-reconfiguring modular robots for adaptive furniture [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 4259 – 4264.
- [3] KAMIMURA A, KUROKAWA H, YOSHIDA E, *et al.* Automatic locomotion design and experiments for a modular robotic system [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2005, 10(3): 314 – 325.
- [4] YIM M, ROUFAS K, DUFF D, *et al.* Modular reconfigurable robots in space applications [J]. *Autonomous Robots*, 2003, 14(2/3): 225 – 237.
- [5] 刘金国,王越超,李斌,等.一种可重构模块机器人中心构型的选择方法[J]. *中国科学 E 辑:信息科学*, 2007, 37(10): 1316 – 1328.
- [6] ZHAO Jie, CUI Xindan, ZHU Yanhe, *et al.* A new self-reconfigurable modular robotic system UBot: Multi-mode locomotion and self-reconfiguration [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1020 – 1025.
- [7] BUTLER Z, KOTAY K, RUS D, *et al.* Generic decentralized control for a class of self-reconfigurable robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 809 – 816.
- [8] PREVAS K C. A hierarchical motion planning strategy for a uniform self-reconfigurable modular robotic system[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 787 – 792.
- [9] SHEN Weimin, KRIVOKON M, CHIU H, *et al.* Multimode locomotion via Superbot reconfigurable robots [J]. *Auton Robot*, 2006, 20(2): 165 – 177.
- [10] KAMIMURA A, YOSLUDA E, MMFA S, *et al.* A self-reconfigurable modular robot (MTRAN)-Hardware and motion planning software [C]//Distributed Autonomous Robotic Systems. Fukuoka, Japan: Springer-Verlag Tokyo, 2002: 17 – 26.
- [11] 赵杰,唐术锋,朱延河,等. UBot 自重构机器人拓扑描述方法 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2011, 43(1): 46 – 49.
- [12] MATSUOKA K. Sustained oscillations generated by mutually inhibiting neurons with adaptation [J]. *Biological Cybernetics*, 1985, 52(6): 367 – 376.
- [13] MATSUOKA K. Mechanism of frequency and pattern control in the neural rhythm generators [J]. *Biological Cybernetics*, 1987, 56(5/6): 345 – 353.
- [14] WILLIAMSON M. Neural control of rhythmic arm movements [J]. *Neural Networks*, 1998, 11(7/8): 1379 – 1394.

(编辑 杨 波)