

空间机器人坐标逆变换高速专用处理机 体系结构及其仿真系统的研究[†]

洪炳镕 李立新 姜 辉

(哈尔滨工业大学计算机系, 150006)

摘 要 本文论述了基于 CORDIC 算法的 6 自由度多关节型机械手各关节转角的坐标逆变换高速专用处理机的体系结构方案。本方案抛弃了传统的解析设计思想, 把坐标的旋转和反正切运算作为基本的处理对象, 提出了以 CORDIC 算法为基础的多 CPU 全并行的专用处理机体系结构, 从而使机械手坐标逆变换处理时间大大缩短。

关键词: 机械手坐标逆变换 专用处理机 多处理机系统 CORDIC 算法

1 引言

在机械手的实际作业控制中通常要处理坐标逆变换。所谓坐标逆变换是指从机械手手端位置和姿势求出各关节转角。在空间机器人或某些装配机器人复杂动作的实时控制中, 为了避免误动作提高系统的效率, 这种坐标逆变换必须在尽可能短的时间内完成。多种方案都提出了并行处理的方法。日本的龟谷等人⁽¹⁾利用 7 个 CPU 和 14 个运算处理单元实现了并行处理, 使坐标逆变换的处理时间减少到 3.3ms。但是, 由于机械手坐标逆变换的解析解中包含有许多非标准的函数计算, 并且解析解中很少有共同的算式, 所以采用传统的方法提取并行性十分困难, 并行度不高, 效果不大。为了使机械手坐标逆变换的处理时间有明显的提高, 就必须找到一种有效的求解析解的算法并采用与此算法紧密相关的专用体系结构。基于这种思想, 本文提出了基于 CORDIC 算法的坐标逆变换专用处理机的体系结构方案。它首先将机械手坐标逆变换的解析解分解为坐标的旋转和反正切的组合, 然后用 CORDIC 算法处理这些基本运算, 而建立在 CORDIC 算法基础上的体系结构能够只用加法和移位很快地完成这些操作, 从而使机械手坐标逆变换能够很快地完成。

2 算法基础

本文所提出的体系结构方案是以 CORDIC 算法为基础的。CORDIC 算法是一种坐标旋转数值计算方法⁽²⁾, 将任意坐标的某一角度的旋转移动通过离散地反复旋转直至收敛而得到, 所用到的操作只有加法、减法和移位。这些操作用硬件能够很快地实现, 从而提高了计算速度, 简化了程序设计。CORDIC 算法的基本运算式如下:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i - \delta_i y_i z^{-j} & (1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} y_{i+1} = y_i + \delta_i x_i z^{-j} & (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} z_{i+1} = z_i - \delta_i \theta_j & (3) \end{cases}$$

其中, $\theta_j = \arctan z^{-j}$ 是离散的角度值。 $j = i - 1 (i \geq 1)$, $\delta_i = \pm 1$ 表示旋转方向。

由 CORDIC 算法计算旋转可以推广到对乘法、除法、反三角函数、双曲函数等进行计

[†] 本课题由国家自然科学基金资助。收稿时间: 1992-05-30

算^[3], 这只需对初始值进行特殊选择, 应用 CORDIC 算法计算机械手坐标逆变换的基本模式如图 1^[4]所示:

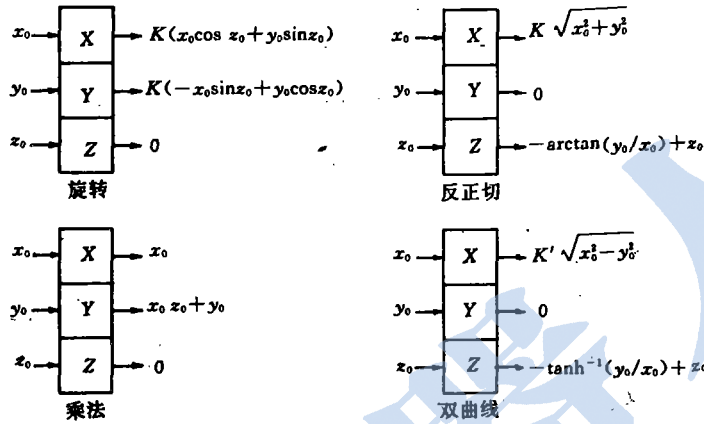


图 1 CORDIC 基本模型

其中, x 表示 X 轴坐标的处理模块; y 表示 Y 轴坐标的处理模块; z 表示离散旋转角的角度值的累计算值。

3 体系结构

根据 CORDIC 算法的基本模式, 本文提出了基于 CORDIC 算法的空间机器人机械手坐标逆变换专用处理机的体系结构方案, 如图 2 所示。

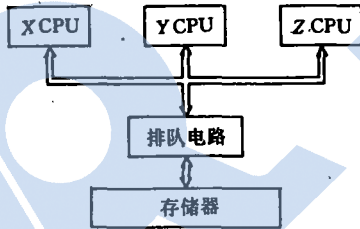


图 2 机械手坐标逆变换专用处理机的体系结构

这是一种紧密耦合的多处理机的体系结构^[5], 其中 X CPU, Y CPU, Z CPU 分别处理 X, Y, Z 三个变量, 只读存储器用来存储离散旋转角和其他一些常量。3 个 CPU 之间的数据通讯通过公共存储器来实现。在运算过程当中, 为了避免访问公用存储器的冲突, 在 3 个 CPU 和存储器之间增加了一级排队电路, 它根据预定的优先级来分别使用公共存储器。在本文的方案中, 为了避免读取数据, 我们规定写操作优先于读操作; 另外, 由于前一次读操作和下一次写操作中间要间隔较长时间, 且对同一存储单元的写操作和读操作是间隔进行的, 因而一个 CPU 对同一存储单元不会连续进行两次写操作或读操作。这样就避免了误取数据和数据丢失的现象, 对于两个以上的 CPU 对存储器进行同一种操作的请求, 可人为地事先规定优先级。

根据 CORDIC 算法, 本文所提出的体系结构中的 CPU 只须进行加法和移位操作, 这是快速和简单的。3 个 CPU 通过各自的并行算法程序进行并行操作。并且根据 CORDIC 算法 3 个处理机在处理机械手坐标逆变换时, 所要处理的加法和移位次数是相等的, 因而这种体系结构并行度高, 冗余度小。

4 性能评价

本文所提出的机械手坐标逆变换专用处理机体系结构方案在设计思想上与传统的设计方法有本质的区别,下面讨论一下它的性能.

4.1 处理速度

本文所提出的多处理机方案处理机械手坐标逆变换的处理速度要根据 CPU 的具体种类而定,处理时间由下式决定:

$$t = T \times (H \frac{k+1}{2}) \times m \times k \quad (4)$$

其中, T 为 CPU 的机器周期, k 为精度, m 为机械手坐标逆变换解析解分解为 CORDIC 基本式的个数. 6 自由度 PRPRPR 型机械手的 $m=25$.

4.2 误差

本文所提出的体系结构方案是以 CORDIC 算法为基础的, CORDIC 算法的特点就是离散旋转逐步逼近,它在处理过程中的误差,取决于式(4)中的 k , k 越大,误差越小.即

$$\text{误差} < \arctan 2^{-k}$$

$$\text{则} \quad \text{相对误差} = 20 \lg \frac{\text{误差}}{\text{真值}} \quad (5)$$

4.3 灵活性

本文所提出的方案可以通过更换程序存储器的方法来适应各种不同场合的应用.我们知道,机械手坐标逆变换没有通解,只能对每种特定场合分别求解.为了适应各种类型机械手的不同情况,要求专用机体系结构必须有很大的灵活性.

4.4 体积

本文所提出的方案只用三个微处理机芯片,因而体积小,重量轻,有利于空间机器人在线式工作向离线式工作过渡.

5 实验及仿真系统

根据图 2 所示的体系结构方案,我们制作了一套实验系统,系统中的 CPU 我们采用的是市场上容易购置的单片机,基本 Z CPU 的运算部分我们采用的是 16 位定点小数的补码运算,其中 1 位符号位,2 位整数位,13 位小数位.这样,根据 CORDIC 算法,误差 $\arctan 2^{-13}$;而 X CPU、Y CPU 均采用 1 位符号位,15 位小数位.时钟我们采用统一的 12MHz 晶振,这样,一个时钟周期为 $1\mu\text{s}$.在 CPU 开始计算时,我们开始定时直到单片机运算完了,这时定时计数器的值即为整个运算过程中所用的时钟周期数.

实验系统的软件我们是针对图 3 所示的 RPPRPR 型机械手进行编制的.

图中的 l_1, l_2 我们均假设其为 0.3m.

根据式(4), $t < \frac{1+13}{2} \times 1\mu\text{s} \times 13 \times 25 = 2275\mu\text{s}$,此结果与定时结果相符,而采用 IBM PC386 在时钟为 33 MHz 时用解析解直接求解的方法计算同一种角度实测约 88ms 左右.在图 2 所示的体系结构方案中,若 CPU 采用比单片微机更高级的处理器(如 transputer 或其他大规模数值处理器),则处理速度会有更大的提高,处理时间能达到几百——几十微秒的数量级.

在仿真系统中,输入输出装置我们采用的是 IBM PC386,整个仿真系统与专用处理机实际操作时的环境基本一致.仿真时,我们是以手端在空间作圆运动来进行计算的,作圆运动的

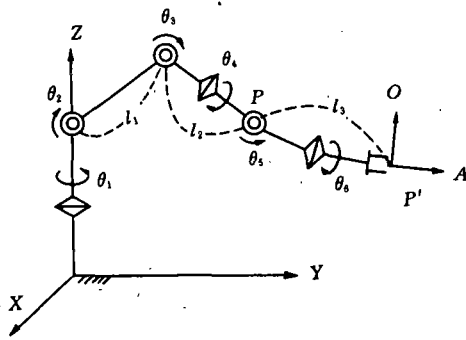


图3 RPPRPR型机械手

手端坐标是按式(6)~(12)计算的.

$$k = 0 \sim 100 \quad (6)$$

$$\varphi = k\pi/50 \quad (7)$$

$$P_x = 0.3 + 0.1 \cos\varphi \quad (8)$$

$$P_y = 0.1 \sin\varphi \quad (9)$$

$$P_z = 0.004k \quad (10)$$

$$(A_x, A_y, A_z) = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{-1}{\sqrt{3}} \right) \quad (11)$$

$$(O_x, O_y, O_z) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, 0, \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \quad (12)$$

仿真结果 $\theta_1 - \theta_6$ 的曲线如图4所示.

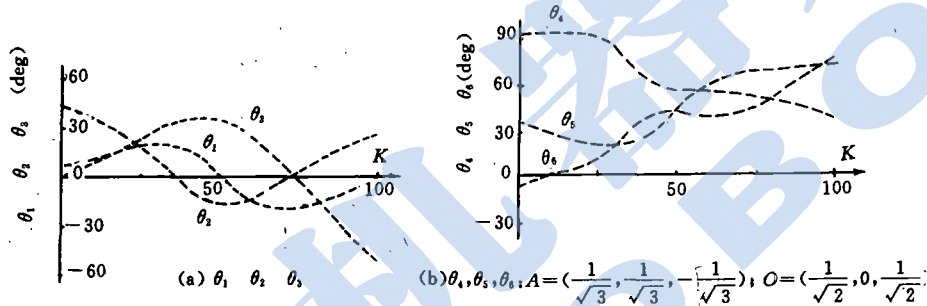


图4 仿真结果

仿真结果的相对误差按式(5)计算.

经过测试可知角 θ_3 的精度最高为-86 db,第六关节角 θ_6 的精度最差为-56 db.

6 结论

本文提出了一种坐标逆变换专用处理机体系结构方案,这种方案是含3个CPU的紧密耦合型的多微处理器系统,它支持CORDIC算法的基本算式以3路全并行的方式进行工作,由于CORDIC算法本身的特点系统的并行性得到了充分的利用.这种体系结构方案和基于CORDIC算法的并行软件结合在一起,可使机械手坐标逆变换的处理速度大大提高,对于机器人的控制的进一步实时化有重要意义.

参 考 文 献

- 1 龟谷雅嗣,渡部透,河田健一,横屋克浩.マルチマイクロプロセッサによるロボット関節角計算の高速化.日本ロボット学会志,1985,3(4):263-276.
- 2 Jack E Volder, The CORDIC trigonometric computing technique. IRE Trans, Electron, Comput, EC-8, 1959:330-334.
- 3 徐公权,吴时霖,王德新,顾宝发.微程序设计及其仿真技术.上海:上海科学技术文献出版社,1989:204-219
- 4 洪炳镛,李立新,姜辉.空间机器人坐标逆变换超高速算法.机器人,1992,14(3):44-50
- 5 Kai Hwang. Computer arithmetic. John Wiley & Sons, Inc, 1979:84-91.

THE HIGH SPEED SPECIAL-PURPOSE COMPUTER ARCHITECTURE FOR COORDINATE INVERSION OF SPACE ROBOT AND ITS EMULATION SYSTEM

HONG Bingrong LI Lisin JIANG Hui

(Harbin Institute of Technology 150006)

Abstract

In this paper, a high speed computer architecture for coordinate inversion is presented, which is used for six-degree of freedom joint manipulator. This architecture is based on CORDIC algorithm. It abandons the traditional resolver idea, and treats coordinate rotation and arctangent operation as basic unit. This architecture has three CPU and it works in parallel, which makes the processing speed of coordinate inversion for manipulator improved greatly.

Key words: coordinate inversion for manipulator special purpose computer multi-processing units system CORDIC algorithm

(本文第一作者李立新,男,25岁,硕士,助理工程师.主要研究领域:机械手坐标逆变换的研究、工业自动化、专家系统和计算机网络.)

(上接第 34 页)

A ROBOT ARM FORCE CONTROL SYSTEM 'GRAFC'

HUANG Yalou LIU Jingtai TONG Weibin LU Guizhang

(Nankai Univ., Tianjin 300071)

Abstract

A robot force control system consisting of vision and force/torque sensors is constructed. The system is composed of two levels, the upper level and the lower level. The upper level is responsible for task planning and supervising as well as force control. It uses vision information for the planning of gross motion, and force sensory data and position data feedback by lower level for the control of fine motion. The lower level, a servo system developed in our laboratory, is in charge of the servoing of joints. On this system, some contact tasks requiring of force control have been implemented.

Key words: force control hybrid position/force control hierarchical contour tracking peg-into-hole assembly

(本文第一作者,黄亚楼,男,28岁,博士生.所从事的研究领域:机器人力控制、多机器人协调运动规划及协调控制、智能控制.)