

[文章编号] 1007-7405(2017)03-0055-05

基于 Cilk 的不确定机械手主控 LM 算法并行化研究

李旺¹, 潘谜², 王巍¹

(1. 集美大学计算机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学理学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 由于不确定机械手本身的非线性、复杂的特性, 普通主控算法无法实现有效控制。提出了基于 Cilk 的主控 LM 算法, 旨在通过多核并行处理, 提高系统的响应能力。建立了基于 LM 的核心算法, 并针对 3 种拟合函数作并行化处理, 研究 Cilk 并行化对算法性能的影响。实验表明, Cilk 能够有效提升 LM 算法性能, 从而提升主控系统的响应能力。

[关键词] 并行处理; LM 算法; Cilk

[中图分类号] TP 302; TP 391.8; O 242.1

Parallel LM of Uncertain Multi-Finger Robot Host System Based on Cilk

LI Wang¹, PAN Mi², WANG Wei¹

(1. College of Computer Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. School of Science, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Effective control can't be obtained by general host system, because of the nonlinearity and complexity of uncertain multi-finger robot. This paper puts forward an uncertain multi-finger robot host system based on Cilk & LM algorithm, which improves the system responsiveness with multiprocessor technology. Also this paper builds a core algorithm based on LM, handles the parallel processing of 3 fitting function models, and checks the effect of Cilk. The experiments show that Cilk can improve the performance of LM algorithms, and promote the capacity and responsiveness of the host system.

Keywords: parallel processing; LM algorithm; Cilk

0 引言

近年来, 随着机器人技术的迅猛发展, 多关节多自由度的机器人灵巧手(简称机械手、灵巧手)已成为机器人研究领域的热点之一。目前, 机械手方面的研究主要集中于两个方面: 1) 多指机械手静力及抓取受力模型。如 NASA 手^[1]、Gifu II^[2]、DLR/HIT Hand II^[3]、仿真灵巧手^[4]等, 主要研究机械结构设计、电路设计、传感器设计、抓取姿态及受力分析等。2) 机械手控制系统。主要研究传感器实时性、稳定性、通信协议、同步阻抗以提高嵌入式控制系统的精准度与抗干扰能力^[5-6]。

上位机主控制系统, 几乎仍然沿用简单的控制模型, 并广泛应用于工业控制流水线^[7], 而对于不确定机械手控制系统的研究几乎为零。由于现有工控基本上都采用同步固定模式, 随着自由度的增加和抓取方式的多样性, 使得多指机械手主控系统变得异常复杂^[8-9]。

[收稿日期] 2016-11-15

[修回日期] 2016-12-22

[基金项目] 福建省教育厅科技项目(JA15262)

[作者简介] 李旺(1980—), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为人工智能、算法设计与优化、分布式计算。

多处理器编程 (multi processor programming) 是一种改变传统的单线程串行程序模式。目前常用的多核编程模型有 MPI、OpenMP、Intel IPP、Intel TBB、Intel Cilk、MapReduce、PFX 等^[10]。Cilk^[11]最早是由 MIT 开发的基于 GCC 编译器的开源项目, 被英特尔公司收购后, 整合进英特尔的编译器中。Cilk Plus 是 Intel 为 C/C++ 提供的细颗粒的并行任务支持, 在不涉及多线程编程的情况下, 具高效利用多核处理器的并行计算能力^[12]。

通常衡量机械手系统先进程度的主要标准就是其所采用的控制技术。本文针对机械手抓取力的不确定性, 提出基于 Cilk 的多处理器主控 LM 算法, 旨在通过并行处理减少时滞, 提高系统响应能力。

1 模型分析

对于不确定 n 指机械手, 由于每次抓取的物体质量不确定, 因此需要主控程序试探并计算出最优的抓取受力, 即能成功抓取物体时的最小受力。

假定 n 个手指抓取物体时的位置已经确定。假定采集时得到 $n + 1$ 个数值 $(f, x_1, x_2, \dots, x_n)$, f 表示状态, 其余 n 个数值使用向量 \mathbf{X} 表示, 即: $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 其中, x_1, x_2, \dots, x_n 表示 n 个手指采集点的受力值, 值域为 $[0, A]$ (假定所有手指的值域都相同)。状态 f 取值为 0 或 1, 0 表示非稳定状态 (即没有抓牢), 1 表示稳定状态。同时, 假定控制时向机械手发送 n 个数值 (x_1, x_2, \dots, x_n) , 即每个手指新的受力值, 也使用向量 \mathbf{X} 表示。因此, 主控程序的关键算法就是当 f 为 1 的前提下, 求 \mathbf{X} 向量的最小值。即:

$$\begin{cases} \min(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ \text{st: } f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1. \end{cases} \quad (1)$$

由于假定 n 个手指位置已经确定, 根据力学知识, 在达到理想的平衡状态时, 各个手指的受力符合一定的线性关系。本文选取所有手指受力累加作为衡量标准, 则式 (1) 可简化为:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^n x_i, \\ \text{st: } f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1. \end{cases} \quad (2)$$

2 测试模型

由于从机械手传感器采集到的一系列点均属于散点, 它并没有函数模型, 甚至是否连续、是否可导也是不确定的。因此主控系统在不确定散点模型的情况下, 为了能够预测精确抓取力, 通常使用函数拟合的方式来逼近。

为了测试 Cilk 在不同模型下性能改善的情况, 这里选取 Levenberg-Marquardt 算法 (简称 LM 算法) 作为控制系统主算法, 并分别选取不同的拟合模型。

2.1 拟合函数

拟合函数分别选取如下 3 种具有代表性的函数模型: 1) 线性函数 $f(x) = \alpha x + \beta$, 记为 L ; 2) 二次函数 $f(x) = \alpha x^2 + \beta x + \gamma$, 记为 Q ; 3) 对数函数 $f(x) = \alpha \ln x + \beta$, 记为 G 。

2.2 LM 算法

LM 算法是使用最广泛的非线性最小二乘算法, 一般用于曲线拟合^[13]。

对于公式 (2) 中的模型, 记雅可比矩阵为:

$$\mathbf{J}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} \partial f_1 / \partial x_1 & \cdots & \partial f_1 / \partial x_n \\ \vdots & & \vdots \\ \partial f_m / \partial x_1 & \cdots & \partial f_m / \partial x_n \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Hesse 矩阵为:

$$\mathbf{H}(\mathbf{X}) = 2\mathbf{J}^T(\mathbf{X})\mathbf{J}(\mathbf{X}), \quad (4)$$

则, 对于第 k 个采集点, 记:

$$\begin{cases} \mathbf{J}(\mathbf{X}_k) = \mathbf{J}_k, \\ \mathbf{H}_k = \mathbf{H}(\mathbf{X}_k) = 2\mathbf{J}_k^T\mathbf{J}_k, \\ \mathbf{g}_k = \mathbf{J}_k f(\mathbf{X}_k), \\ \mathbf{s} = \mathbf{X} - \mathbf{X}_k, \\ \mathbf{L}_k(\mathbf{s}) = f(\mathbf{X}_k) + \mathbf{J}_k \mathbf{s}. \end{cases} \quad (5)$$

那么 LM 算法描述如下:

初始: 给出 \mathbf{X}_0 和 $\lambda_0 = 2, k = 0$ 。

- 1) 给出 \mathbf{X}_k 和 λ_k , 计算 \mathbf{g}_k 和 \mathbf{H}_k , 若 $\|\mathbf{g}_k\| \leq \varepsilon$, 停止。
- 2) 求解 $\mathbf{H}_k + \lambda_k \mathbf{I}$, 如果不正定, 置 $\lambda_k = 4\lambda_k$, 并重复这一步, 直到 $\mathbf{H}_k + \lambda_k \mathbf{I}$ 正定。
- 3) 求解方程组 $(\mathbf{H}_k + \lambda_k \mathbf{I})\mathbf{s} = -\mathbf{g}_k$, 求出 \mathbf{s}_k 。
- 4) 若 $\|\mathbf{s}_k\| \leq \varepsilon(\|\mathbf{X}_k\| + \varepsilon)$, 则停止。
- 5) 计算增益率 $\delta = (f(\mathbf{X}_k) - f(\mathbf{X}_k + \mathbf{s}_k)) / (\mathbf{L}_k(0) - \mathbf{L}_k(\mathbf{s}_k))$ 。
- 6) 若 $\delta \leq 0$, 则置 $\lambda_{k+1} = 4\lambda_k$; 否则, 令 $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{s}_k, \lambda_{k+1} = 2$ 。
- 7) 令 $k = k + 1$, 转 1)。

2.3 矩阵正定性判定

LM 算法为解决奇异矩阵导致的收敛性问题, 引入 $\mathbf{H}_k + \lambda_k \mathbf{I}$ 正定性的判定。由于 $\mathbf{H}_k + \lambda_k \mathbf{I}$ 是对称矩阵, 而对称矩阵正定的等价条件有: 对应的二次型正定、所有主子式大于 0、所有顺序主子式大于 0、所有特征值大于 0 等^[14]。本文选取特征值作为判定依据。

常用的计算特征值及特征向量的算法有 Jacobi 方法和 QR 分解法。由于 Jacobi 方法具有较好的并行性, 本文选取 Jacobi 方法。

给定对称矩阵 \mathbf{C} 及误差 ε , Jacobi 方法描述如下:

- i) 在矩阵 \mathbf{C} 非对角线元素中选取绝对值最大非零元素 c_{ij} ; 若 $c_{ij} < \varepsilon$, 则矩阵 \mathbf{C} 主对角线元素即为 \mathbf{C} 的全部特征值, 否则转 ii)。
- ii) 由公式 $\tan 2\theta = 2c_{ij} / (c_{ii} - c_{jj})$ 求出 θ , 从而得平面旋转矩阵 $\mathbf{P} = \mathbf{P}_{ij}$ 。
- iii) $\mathbf{C}_1 = \mathbf{P}^T \mathbf{C} \mathbf{P}$, 令 $\mathbf{C} = \mathbf{C}_1$, 转 i)。

3 并行化处理

针对拟合函数和 LM 算法分别作并行化处理。

3.1 拟合函数并行化

拟合函数中的系数由采集到的 k 个点 (\mathbf{X}_i, f_i) 的值动态确定。拟合函数与采集数据误差平方和 $\theta = \sum_{i=1}^k (f_i - f(\mathbf{X}_i))^2$, 此时, 由于 \mathbf{X}_i 和 f_i 均为已知值, θ 实质上转化为系数 α, β, γ 的函数。要使 θ 最小, 则必须满足对 α, β, γ 偏导数值为 0。以二次函数 Q 模型为例, 整理后的模型如下:

$$\begin{cases} \alpha \sum_{i=1}^k X_i^4 + \beta \sum_{i=1}^k X_i^3 + \gamma \sum_{i=1}^k X_i^2 = \sum_{i=1}^k X_i^2 f_i, \\ \alpha \sum_{i=1}^k X_i^3 + \beta \sum_{i=1}^k X_i^2 + \gamma \sum_{i=1}^k X_i = \sum_{i=1}^k X_i f_i, \\ \alpha \sum_{i=1}^k X_i^2 + \beta \sum_{i=1}^k X_i + k\gamma = \sum_{i=1}^k f_i. \end{cases} \quad (6)$$

对 $\sum_{i=1}^k X_i$ 、 $\sum_{i=1}^k X_i^2$ 、 $\sum_{i=1}^k X_i^3$ 、 $\sum_{i=1}^k X_i^4$ 合并计算；对 $\sum_{i=1}^k f_i$ 、 $\sum_{i=1}^k X_i f_i$ 、 $\sum_{i=1}^k X_i^2 f_i$ 合并计算。同时使用 Cilk 并行处理合并计算。

其他函数模型的并行化处理类似，不再赘述。

3.2 LM 算法并行化

LM 算法涉及矩阵运算较多，对其作如下并行化处理：

1) 在计算出 J_k 后，将 g_k 和 H_k 的计算并行化。

2) Jacobi 方法并行化处理。由于平面旋转变换 $P_{ij}^T C P_{ij}$ 只改变矩阵 C 的第 i, j 行和第 i, j 列元素。对于两次变换 $P_{i_1 j_1}$ 和 $P_{i_2 j_2}$ ，其中 $i_1 \neq i_2, j_1 \neq j_2$ ，变换时只有 $c_{i_1 j_2}$ 、 $c_{i_2 j_1}$ 和 $c_{j_1 i_2}$ 、 $c_{j_2 i_1}$ 四个元素存在冲突。同理，多次变换冲突元素也可由此类推。因此，并行化处理时，将冲突元素串行化处理后，其余元素采用并行处理。

3) 求解方程组 $(H_k + \lambda_k I)s = -g_k$ 。由于 $C = H_k + \lambda_k I$ 正定，方程组存在唯一解。选取高斯消元法求解方程组。为描述方便，记上述方程组为 $Cs = g$ 。当选择第 i 行第 j 列作为消元基点时，方程组变换公式为：

$$\begin{cases} c_{pq} = c_{pq} - c_{pj}c_{iq}/c_{ij}, p \neq i. \\ g_p = g_p - c_{pj}g_i/c_{ij} \end{cases} \quad (7)$$

而公式 (7) 的计算过程就是可并行的。

4 测试结果及分析

取值域中的 $A = 50$ ，随机产生若干质量在 $[A/10, 9A/10]$ 范围的物体，分别使用 L 、 Q 、 G 模型拟合，针对不同最大迭代次数（记为 N ），研究模型的收敛率、误差率、平均响应时间以及 Cilk 并行化处理后的性能改善效果。

1) 收敛率与误差率 取 $N = 50, 100, 150, 200, 300, 500$ ，对同一测试数据运行 3 次并取平均值。三种模型的收敛率如图 1 所示，误差率如图 2 所示。从实验结果看， Q 模型的收敛速度及误差率均比较稳定； L 模型误差率可控，但收敛速度较慢； G 模型具收敛性。

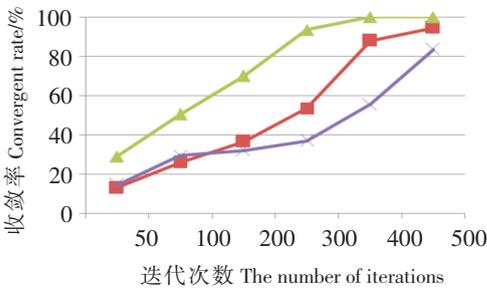


图 1 收敛率折线图

Fig.1 Line chart of convergent rate

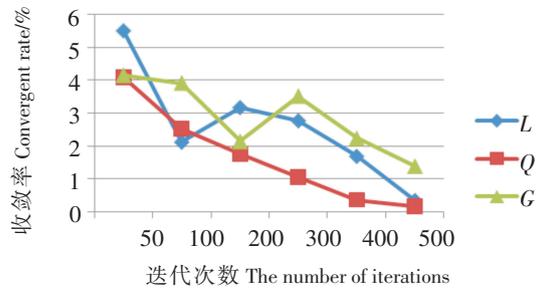
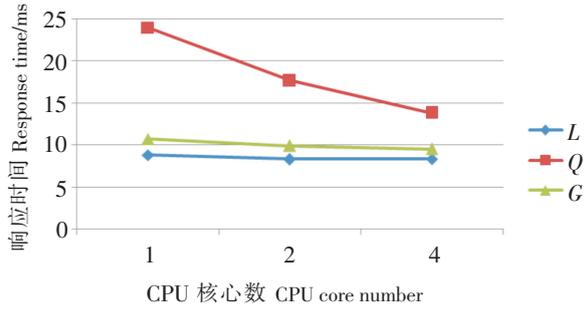
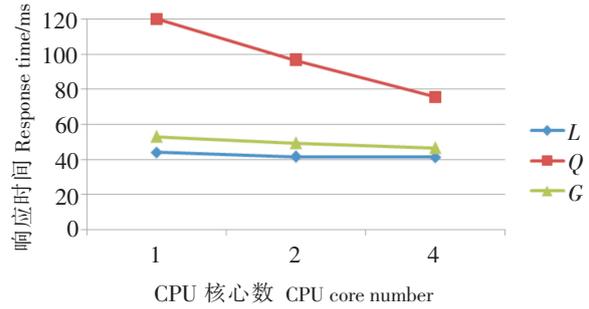


图 2 误差率折线图

Fig.2 Line chart of error rate

2) Cilk 并行化 Cilk 需要多核 CPU 支持，这里分别使用 2 个和 4 个 CPU 核心测试并行化，同时与单核串行对比。由于算法及测试值相同，这里选取响应时间作为研究参数。取 N 为 200 时，响应时间如图 3 所示；当 N 取 500，各模型收敛率及误差率均比较理想时，响应时间如图 4 所示。

从实验数据可以看出，Cilk 对 L 、 G 模型性能提升不是太明显，仅能提升 5% ~ 15% 左右，这是由于线性模型和对数模型计算过程简单，可并行处理的模块相对较少。而对 Q 模型，Cilk 能够有效提升响应性能，最高提升了 58.7%。

图3 $N=200$ 时 Cilk 性能对比图Fig.3 Cilk performance comparison at $N=200$ 图4 $N=500$ 时 Cilk 性能对比图Fig.4 Cilk performance comparison at $N=500$

5 结论

本文针对不确定机械手的非线性、复杂度高的特性, 提出一种基于 Cilk 多核编程的 LM 算法并行化处理方法。分别使用线性函数、二次函数和对数函数作为模拟模型, 并分别作如下并行化处理: 模拟函数系数并行求解、并行化矩阵运算、并行 Jacobbi 方法、并行高斯消元法等, 研究基于 Cilk 的 LM 算法的收敛率、误差率及响应时间。实验表明, Cilk 能够有效提升 LM 算法性能, 从而提升主控系统的响应能力, 其优点是非常显著的。

[参 考 文 献]

- [1] LOVCHIK C S, DIFLER M A. The robonaut hand: adextrous robotic hand for space [C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 1999: 907-912. DOI:10.1109/ROBOT.1999.772420.
- [2] KAWASAKI H, KOMATSU T, UCHIYAMA K. Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu hand II [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(3): 296-303. DOI:10.1109/TMECH.2002.802720.
- [3] 刘伊威, 金明河, 樊绍巍, 等. 五指仿人机器人灵巧手 DLR/HIT Hand II [J]. 机械工程学报, 2009, 45(11): 10-17.
- [4] 陈玉, 夏发银. 三指灵巧手静力学分析与抓取仿真研究 [J]. 湖北工程学院学报, 2016, 36(3): 75-80.
- [5] 兰天. 多指仿人机器人灵巧手的同步控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [6] 侯明鑫. 仿人灵巧手的 EtherCAT 通讯系统及阻抗控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [7] 冯冬芹, 金建祥, 褚健. Ethernet 与工业控制网络 [J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(1): 23-26.
- [8] YAZAREL H, CHEAH C. Task-space adaptive control of robotic manipulators with uncertainties in gravity regress or matrix and kinematics [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2002, 47(9): 1580-1585.
- [9] NOORE A. Real time fault tolerant control of robot manipulators [J]. Mathematical and Computer Modeling, 2003, 38(2): 13-22.
- [10] MATTSON G, SANDERS B, MASSINGILL B L. 并行编程模式/Patterns for Parallel Programming [M]. 张云泉, 贾海鹏, 袁良, 译. 北京: 机械工业出版社, 2015: 40-84.
- [11] 龙国平, 张军超, 范东睿. 众核体系结构对 Cilk 语言的硬件支持及评测研究 [J]. 计算机学报, 2008, 31(11): 1975-1985.
- [12] ROBISON A D. Composable parallel patterns with intel cilk plus [J]. Computing in Science & Engineering, 2013, 15(2): 66-71.
- [13] 张欣. 递归神经网络的并行 LM 算法 [J]. 机械管理开发, 2008, 23(6): 170-171.
- [14] LEON S L. Linear algebra with applications [M]. 张文博, 张丽静, 译. 北京: 机械工业出版社, 2015: 249-340.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 黄振坤)