

移动机械臂平台位置优化及运动规划^①杜 滨^② 赵 京^③

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100124)

摘 要 针对移动机械臂执行任务时移动机械臂的平台位置对机械臂能否完成任务有较大的影响这个问题,研究了平台位置的优化。首先对机械臂的工作空间进行了分析,指出冗余度机械臂对同一个末端点的关节位形不唯一,从而无法度量机械臂的最优运动性能。然后利用机械臂关节自运动,采用可操作度指标向关节梯度方向进行投影,使机械臂的操作能力最大化,从而得到某个末端点的最大操作能力。进而根据得到的工作空间中操作能力分布,定义了相对可操作度指标,并绘制了全局操作能力图,得到了平台相对于目标对象的最佳平台位置。最后利用相对可操作度指标来启发快速搜索随机树(RRT)搜索,使机械臂在完成任务的过程中不断提高操作能力,在达到目标对象时处于最佳位形。对上述方法进行了数值仿真,结果验证了该方法的有效性。

关键词 移动机械臂, 自运动, 启发指标, 可操作度, 快速搜索随机树(RRT)

0 引 言

移动机械臂系统通常由一个移动平台和一个机械臂组成,机械臂安装在移动平台上,这种结构使机械臂拥有几乎无限大的工作空间和高度的运动冗余性。移动机械臂的运动冗余性使它的运动规划变得复杂。

本文针对这一问题展开研究。为不失一般性,以抓取操作为例:对于 C 点处指定的目标对象,移动平台从 A 处运动到 B 处,使指定的对象处于机械臂的工作空间中,然后机械臂从初始位姿运动到对象的目标位姿,最后完成抓取操作。这样通过使移动机械臂的运动解耦,使子系统运动最优化。然而在考虑机械臂的关节运动范围限制以及工作环境中的障碍物情况下,即使目标对象处于机械臂的工作空间内,机械臂同样有可能无法完成任务,或者在完成任务的过程中,机械臂的运动能力低下,甚至出现奇异位形。所以移动平台的位置以及机械臂的运动方式对于机械臂执行任务尤为重要。本文对移动平台的位置及机械臂在执行任务过程中的性能进行了

分析。同时针对冗余度机械臂,考虑了机械臂逆解的多解性问题和机械臂完成任务的质量,确定了移动平台的最佳位置及机械臂完成任务时的最佳位姿。

1 相关研究

为了定量分析机械臂操作能力的大小,Yoshikawa 等提出了基于雅可比矩阵的操作度指标。这个指标对机器人的设计及运动控制都非常有用^[1,2]。Nagatani 等^[3]利用可操作度指标,在保持机械臂操作能力的条件下,对移动机械臂进行了运动规划。在移动平台和机械臂同时运动的情况下,Shan 等^[4]利用可操作度指标对移动机械臂进行了运动规划。Dong 等^[5]针对移动平台定位精度较低的情况,提出了一种变分可操作度指标,并将该指标作为约束条件,通过优化目标函数对移动机械臂进行了规划跟踪控制。

雅可比矩阵依赖于关节位形,所以可操作度作为局部指标只对某个特定的机械臂位姿有效。为了对机械臂工作空间进行整体的可操作能力分析,研

① 国家自然科学基金(51075005)资助项目。

② 男,1985 年生,博士生;研究方向:移动机械臂协调控制;E-mail: wddc@163.com

③ 通讯作者,E-mail: zhaojing@bjut.edu.cn

(收稿日期:2012-08-07)

究机械臂操作能力在空间的分布情况,构造一个全局的操作能力指标显得尤为必要。Pham 等^[6]将工作空间中某个区域的操作能力对整个工作空间进行积分,从而得到工作空间的全局操作能力指标。Gotlib 等^[7]利用工作空间中最大的最小奇异值和某个点的最小奇异值定义速度异性参数,并用它来反映机械臂工作空间的性能分布。对于机械臂在完成任务过程中需要较大的力矩和较高的能量的问题,Hammond 等^[8]利用力矩加权同性指标作为多目标耗散函数,来解决机械臂基座最佳位置问题。

在前期的研究中,移动平台上的机械臂大多数是非冗余的^[3,5,7,9],非冗余机械臂运动学逆解的唯一性,使机械臂工作空间的运动性能分布也唯一确定。然而,移动机械臂平台位置误差对机械臂末端的定位精度有较大的影响^[6,9]。非冗余机械臂运动学逆解的唯一性,使移动平台的位置误差不可避免地传递到机械臂末端。通过增强机械臂的冗余性能能够有效减小机械臂末端的位姿误差,同样也加大了对机械臂工作空间分析的难度。Zacharias 等^[10]对 7 自由度拟人机械臂的可达性进行了研究,通过机械臂在关节空间随机采样来定义机械臂工作空间的可达性指标。利用可达性指标得到机械臂工作空间能力图。通过该图来确定机械臂基座相对于目标对象的最佳位置关系。对于多个目标对象,Ruehl 等^[11]定义抓取度指标来分析机械臂的基座位置及抓取质量问题。

对移动机械臂最佳平台位置的相关问题,学者们同样进行了研究。Berenson 等^[12]定义抓取度量函数,对移动机械臂的位姿节点进行打分。通过协进化优化算法,得到移动平台的最佳平台位置及机械臂的最优目标位形。对于目标对象周围存在障碍物的情况,Richards 等^[13]基于一系列非线性作用函数,利用 LM 算法来确定移动机械臂的抓取位姿。这种方法同时考虑了移动机械臂的避障及机械臂关节运动的限制。对于受非完整约束的移动机械臂,Monastero 等^[14]构建了一个包含操作能力和位姿稳定性的指标,利用该指标对给定的机械臂末端位姿或者轨迹跟踪进行分析,从而确定移动机械臂的最佳平台位置。

2 最佳平台位置

对于非冗余度机械臂,在工作空间中任意末端点 p_i 有唯一的关节位形。机器人在该位形下的性

能指标大小唯一确定。而对于冗余度机械臂,由于存在多解性,任意末端点 p_i 对应的关节位形并不唯一。不同的关节位形得到的性能指标值也不相同。为了对冗余度机械臂工作空间进行性能分析,采用机械臂自运动的方式来获取 p_i 点的所有可能位形。将所有位形中最大的性能指标值作为该点处的性能指标值。为了更加有效地分析工作空间,采用可视化的方式对工作空间进行了描述。从而得到目标对象与移动平台的相对位置关系。

2.1 可操作度指标

假设冗余度机械臂具有 n 个自由度、 m ($m \leq n$) 个末端绝对运动参数,其末端操作速度与关节速度之间的关系为

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (1)$$

它代表操作空间 $X \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ 与关节空间 $q \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 之间的位移关系。

将式(1)两边同时对时间 t 求导,得到 q 与 X 之间的微分关系

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (2)$$

式中: $\dot{X} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$: 机械臂末端在操作空间的广义速度; $\dot{q} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$: 机械臂关节速度; $J(q) \in \mathbb{R}^{m \times n}$: 机械臂雅可比矩阵,对于冗余度机械臂, $m < n$ 。

冗余度机械臂逆解的最小范数解为

$$\dot{q} = J^+ \dot{X} \quad (3)$$

式中: J^+ 为雅可比矩阵的广义逆,当 J 行满秩时, $J^+ = J^T(JJ^T)^{-1}$ 。

为了定量分析运动能力的大小,Yoshikawa^[2]定义可操作度指标为

$$w = \sqrt{\det(JJ^T)} = \sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_m \quad (4)$$

可操作度的物理意义可解释为机器人各个方向上运动能力的综合度量,是对机器人整体可操作能力的综合度量。

2.2 自运动采样

冗余自由度机械臂的雅可比矩阵是长方矩阵,无论是否满秩,都没有常规的逆,而只有广义逆。梯度投影法(Gradient Projection Method, GPM)是 Liegeois^[15]首先提出来的一种基于广义逆的算法。这种方法将逆运动学问题的解分解为最小范数解和齐次解两部分,式(2)的通解为

$$\dot{q} = \dot{q}_s + \dot{q}_h = J^+ \dot{X} + (I - J^+ J)v \quad (5)$$

式中: $\dot{q}$ 的第一项是速度方程(式(2))的最小范数解 $\dot{q}_s$ 。第二项是速度方程(式(2))所对应的其次线性方程的通解 $\dot{q}_h$ 。 v 是 n 维实空间 $\mathbb{R}^n$ 中的任意矢量,即任意的关节速度矢量。 $(I - J^+ J)$ 是零空间投

影矩阵, $(I - J^+ J)v$ 是 v 在零空间 $N(J)$ 中的投影。

为了获取冗余度机械臂工作空间中 p_i 点的最大可操作度值, 我们选择标量函数 $w(\theta)$ 为待优化的性能指标, 同时考虑关节运动范围的限制, 其梯度矢量记为 $\nabla w \in \mathbb{R}^n$, $\nabla w_i = \partial w / \partial \theta_i$, 则式(5)表示为

$$\dot{q} = k(I - J^+ J) \cdot \nabla w \quad (6)$$

其中的系数 k 为优化因子, 它决定机械臂关节自运动的大小。一般而言, 极大化 $w(\theta)$ 需要选择正的 k 值, 而极小化 $w(\theta)$ 则需要选择负的 k 值。值得一提的是, 优化因子 k 越大, 优化效果越强, 但是过大的优化因子 k 将导致算法的震荡, 机械臂无法实现控制。如果优化因子 k 取得过小, 又会使算法优化性能太差。选择合适的优化因子在自运动求解过程中尤为重要。在给定的时间范围 T 内, $w(\theta)$ 沿着梯度的方向不再改变, 即有

$$\lim_{t \rightarrow T} \nabla w = a \quad (7)$$

机械臂自运动达到关节的极限位置。其中 T 为设定的时间范围, a 为一个常数向量。机械臂末端 p_i 点通过向正负梯度方向进行投影, 就能得到机械臂自运动下的所有优化关节位形, 工作空间中某个位姿点的自运动如图 1 所示。本文中, 在考虑各个关节的运动范围限制的前提下, 机械臂自运动的目的是获取 p_i 点处的最大可操作度值, 故优化因子 k 取正值, 对式(6)求解即可满足要求。如图 2 所示。

将冗余度机械臂的工作空间离散为一系列的坐标点 $p_i (i = 1, \dots, n)$, 对每个 p_i 点进行自运动采样。判断采样得到的所有关节位形的可操作能力, 将能力最大的值作为该点的性能指标值。这样就能确定冗余度机械臂在工作空间的运动能力。

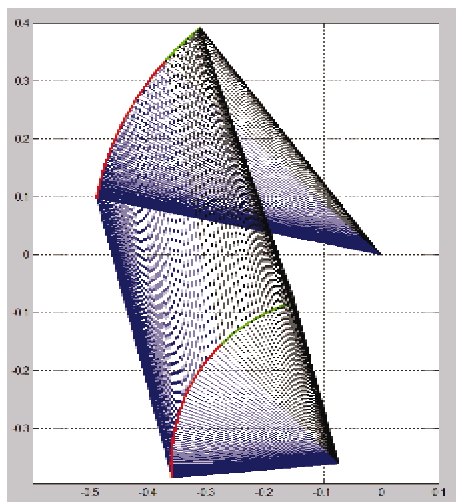


图 1 平面 3R 冗余度机械臂自运动所有关节位形

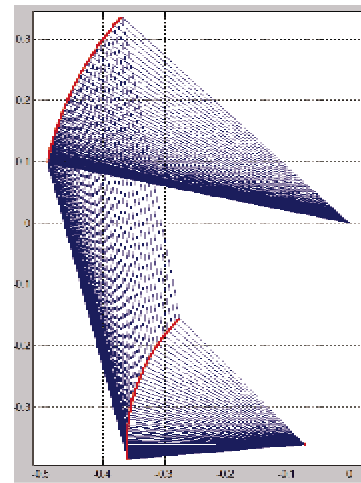


图 2 自运动使可操作能力不断增强的关节位形

2.3 全局操作能力图

对移动机械臂而言, 机械臂是否能够完成任务或者是否具有较好的运动性能, 通常受到移动平台的位置和机械臂目标位形的影响。移动平台相对于目标对象的位置不恰当, 将导致目标对象的不可达。传统方法采用等值线图对工作空间进行描述。等值线图对平面机器人进行分析很有效, 但对空间机器人进行分析时, 该方法很难直观地表示出工作空间的运动性能情况。

为了更加形象地描述工作空间, 同时考虑机械臂关节运动限制及避障, 操作能力指标需要与其他的指标进行运算, 采用一个无量纲的指标显得尤为重要。为此, 我们定义相对可操作度指标来使可操作度指标归一化。工作空间中坐标点 p_i 的相对可操作度为

$$u_i = \frac{w_i}{w_{\max}} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (8)$$

式中: u_i 为 p_i 点的相对可操作度值。 w_i 为 p_i 点的由关节自运动得到的最大可操作度值。 $w_{\max}$ 为机器人整个工作空间中的最大可操作度值。 u_i 的取值范围为 $[0, 1]$, $u_i = 0$ 表示该点处于奇异位形; $u_i = 1$ 表示该点为工作空间中运动性能最好的点。

移动平台上的机械臂为七自由度冗余机械臂, 该机械臂的坐标系及 DH 参数分别如图 3、表 1 所示。将机器人工作空间网格化, 如图 4 所示, 然后将 p_i 点放置在单位网格的中心。在 p_i 处放置一个单位球体, 该球体的半径和颜色由该点处的相对可操作度决定。以空间 7R 冗余度机器人为例, 在不考虑关节限制的情况下, 工作空间的运动性能分布如图 5 所示。该工作空间呈现球形, 球体上不同的区

域,运动性能具有较大的差异。为了更好地观察机械臂工作空间的运动性能,将工作空间从中间切开,如图 6 所示。利用工作空间特征化后得到的全局操

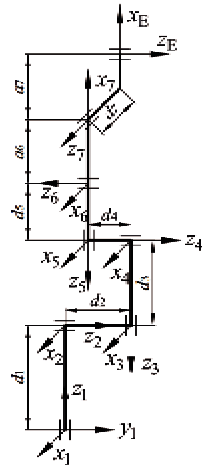


图 3 七自由度机械臂坐标系

表 1 机械臂 DH 参数表

序号	连杆长度 $a_i(m)$	扭角 $\alpha_i(^{\circ})$	连杆偏置 $d_i(m)$	关节角 $\theta_i(^{\circ})$
1	0	-90	0.0816	$\theta_1(0)$
2	0	-90	0.0074	$\theta_2(0)$
3	0	90	-0.1467	$\theta_3(0)$
4	0	-90	-0.005397	$\theta_4(0)$
5	0	-90	-0.1437	$\theta_5(0)$
6	0.078	90	0	$\theta_6(90)$
7	0.078	90	-0.0205	$\theta_7(0)$

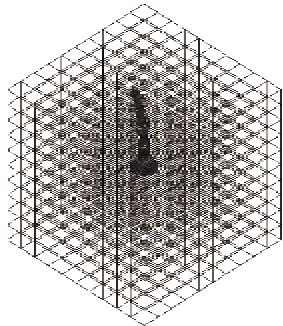


图 4 机械臂工作空间网格化

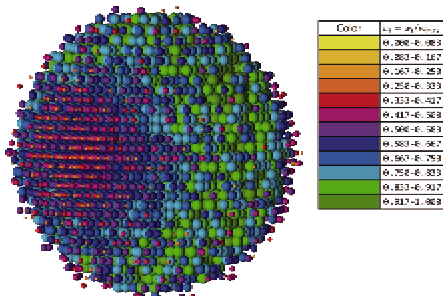


图 5 空间 7R 机器人工作空间运动性能分布

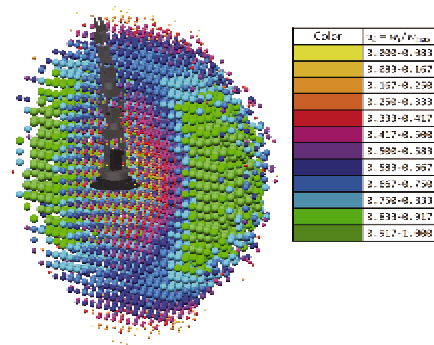


图 6 七自由度机械臂的工作空间性能分布的图形表示

作能力图,将目标对象放置在全局操作能力图中操作能力最强的点,即 $u_i = u_{max}$, $u_{max} = 1$,这样就得到了移动机械臂移动平台的最佳平台位置。

3 机械臂局部规划

上节中通过自运动的方式,确定了冗余度机械臂工作空间的全局运动性能。在机械臂完成任务时,为了获得较好的性能指标,往往通过运动移动平台使目标对象处于机械臂工作空间中运动性能最好的位置或区域。然后机械臂从初始关节位形运动到目标关节位形,完成指定的任务。本节采用快速搜索随机树(rapidly-exploring random tree, RRT)算法,利用相对可操作度为启发函数来引导 RRT 的生长方向。使机械臂末端在趋向目标对象运动的同时,机械臂整体的运动能力不断增强。

3.1 RRT 基本原理

RRT 算法是 Laval^[16]于 1998 年首次提出用于解决高维空间内的路径搜索问题,其基本思想是在搜索空间中从初始点开始生长搜索树,利用随机采样技术引导搜索树的扩充,直到搜索树到达目标点为止。

3.2 启发指标

虽然 RRT 算法在高维空间中能够快速搜索出可行路径,但是其不能有效控制搜索路径的质量,从而导致所得路径并非最优路径。我们利用相对可操作度作为启发函数来引导搜索树的扩展,使机械臂在运动过程中不断增强操作能力。我们定义启发指标 h_i 如下:

$$h_i = u_i \quad (9)$$

在标准 RRT 算法中,仅对 q_{new} 进行一次性扩展。而事实上可以朝着 q_{target} 方向不断进行扩展,直至扩展到满足要求的 q_{new} 为止。基于该思想,本文提出

一种启发式扩展算法。在每一次扩展过程中,当满足

$$x(q_{new}), h \geq x(q_{nearest}), h \quad (10)$$

时,即有新位形节点 q_{new} 的启发值比最近位形节点 $q_{nearest}$ 的启发值大时,退出扩展过程。式中: $x(q) \in \mathbb{R}^6$ 为机械臂上某点 x 处于 q 位姿下的位姿矢量。改进的 RRT 算法可用表 2 描述。通过启发式 RRT 算法,使机械臂的运动性能得到优化,机械臂路径节点的操作能力不断增强。

表 2 改进的 RRT 扩展算法

Function:HeuristicExtend($q_{init}, x(q_{goal}), K, \Delta f$)	
1	$T.add(q_{init})$
2	while iteration < K do
3	q_{random} = random configuration
4	$q_{nearest}$ = nearest neighbor in tree T to q_{random}
5	q_{new} = extend $q_{nearest}$ toward q_{random}
6	if ! $x(q_{new}), h \geq x(q_{nearest}), h$ then
7	continue
8	end
9	if $x(q_{new})$ can connect to $x(q_{nearest})$ then
10	$T.AddVertex(q_{new})$
11	$T.AddEdge(q_{nearest}, q_{new})$
12	end
13	if $\rho(x(q_{new}), x(q_{goal})) < distanceTOGoal$ then
14	break;
15	end
16	end
17	return T

4 仿真实例

为了验证以上提出的基于相对可操作度的最佳平台位置的搜索算法,以及基于改进的 RRT 算法来搜索机械臂的目标关节位形,本节以移动机械臂系统为例开展仿真验证研究。移动机械臂需要完成的任务为抓取一个位置已知的水杯。移动平台是由三个同心方向轮组成的全方位移动平台(OWMR)。将空间 7R 机械臂固定在该平台上方,如图 7 所示。

对于这个特定的任务,应该考虑特定的环境中的障碍情况及关节的运动范围限制。首先对 7 自由度机械臂的工作空间分析。为了更好地观察机械臂工作空间的运动性能,将工作空间从中间切开,如图 8 所示。该空间中运动性能最好的点 p_{max} 相对于机械臂平台的坐标为 $p_{max} = [-0.23635\text{m}, -0.1526\text{m}, 0.10608\text{m}]$, 即 $u_{max} = 1$, 从而确定

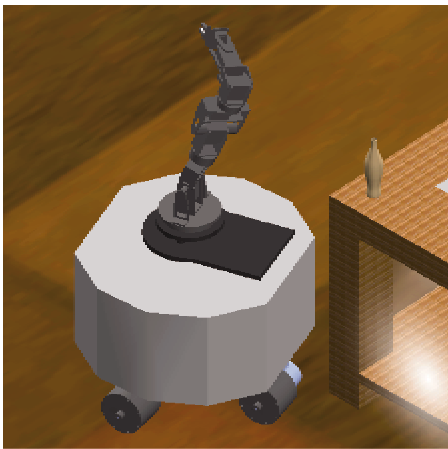


图 7 移动机械臂任务描述

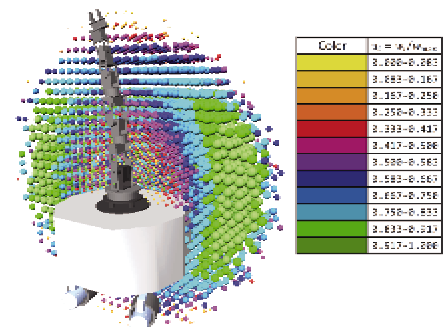


图 8 七自由度机械臂的工作空间性能分布

最佳移动平台位置。通过图 8 可以得出,机械臂在工作空间的内核区域的运动性能较差,机械臂的奇异位形出现在球体的某些边缘区域。运动移动平台使目标对象处于 p_{max} 点,机械臂从初始位形通过启发式 RRT 算法到达目标位形。利用标准的 RRT 算法与启发式 RRT 算法,机械臂搜索的树节点分别如图 9、图 10 所示。图中细线为搜索树,粗线为机械臂末端的运动路径。表 3 对两种搜索算法仿真过程进行了统计。从表 3 中可以得出:标准的 RRT 算法

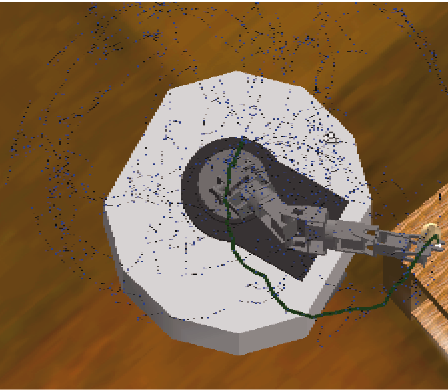


图 9 标准的 RRT 搜索

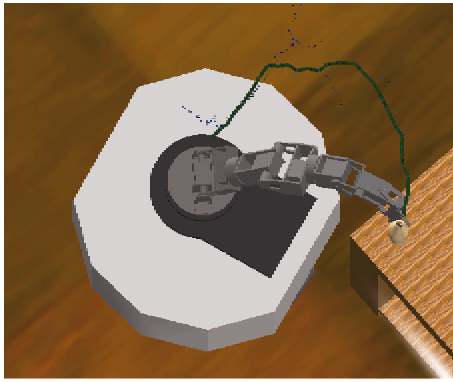


图 10 启发式 RRT 搜索

表 3 算法结果比较

	路径长度 (m)	搜索时间 (ms)	树节点	路径节点
标准 RRT	1.1092	6821.4377	1306	35
启发式 RRT	0.7167	3222.9924	109	30

尽管可以找到一条无碰撞的可行路径,但是该路径存在冗余。而启发式 RRT 算法利用启发指标来引导随机树直接向目标对象方向生长,使冗余路径大大缩短,同时提高了算法的时效性。两种算法中机械臂的操作能力变化如图 11 所示。传统的 RRT 算法中,机械臂的操作能力时大时小,变化没有规律性。而启发式 RRT 算法中,机械臂操作能力不断增强。

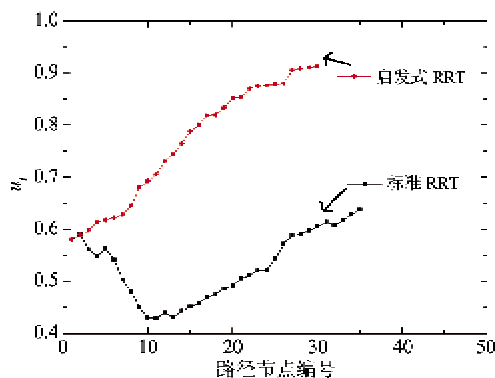


图 11 运动过程中机械臂操作能力的变化曲线

5 结论

冗余度机械臂对同一个末端点的关节位形不唯一,从而无法度量机械臂的最优运动性能。本文采用机械臂关节自运动采样,利用可操作度作为梯度函数来最大化机械臂的可操作能力。相对可操作度

指标能够有效地反映机械臂在工作空间中的运动性能分布情况。利用全局操作能力图对机械臂的工作空间进行可视化分析,能够确定移动平台相对于目标对象的最佳位置。全局操作能力图不仅适用于移动机械臂的最佳平台位置的确定,同样可用于工业机器人基座位置的确定。

对于得到的最佳平台位置,采用启发式 RRT 算法对机械臂进行运动规划。利用相对可操作度为启发函数来引导 RRT 的生长方向,在保证完成任务的同时,不断提高机械臂的操作能力。使机械臂在到达目标对象时,机械臂处于最佳位姿。仿真结果表明,启发式 RRT 算法有效地缩短了搜索时间及路径的距离,能够使机械臂在完成任

务的时候处于最佳位姿。本文中的启发 RRT 算法能够有效地缩短机械臂末端路径的距离,但实验结果表明,该路径仍然存在一定的冗余。在未来的工作中,我们将考虑移动平台运动过程中的位置定位误差对机械臂执行任务的影响,以及如何消除机械臂冗余路径及路径平滑处理等问题。

参考文献

- [1] Yoshikawa T. Analysis and control of robot manipulators with redundancy. In: Proceedings of the 1st International Symposium on Robotics Research, Cambridge, USA, 1984. 735-747
- [2] Yoshikawa T. Manipulability of robotic mechanisms. *International Journal of Robotics Research*, 1985, 4(2): 3-9
- [3] Nagatani K, Hirayama T, Gofuku A, et al. Motion planning for mobile manipulator with keeping manipulability. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne, Switzerland, 2002. 1663-1668
- [4] Wanli S, Nagatani K, Tanaka Y. Motion planning for mobile manipulator to pick up an object while base robot's moving. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Shenyang, China, 2004. 350-355
- [5] Dong H S, Hamner B S, Singh S, et al. Motion planning for a mobile manipulator with imprecise locomotion. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Piscataway, USA, 2003. 847-853
- [6] Pham H H, Chen I M. Optimal synthesis for workspace and manipulability of parallel flexure mechanism. In:

- Proceedings of the 11th IFToMM World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Tianjin, China, 2003
- [7] Gotlih K, Kovac D, Vuherer T, et al. Velocity anisotropy of an industrial robot. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, 27(1): 205-211
- [8] Hammond F L, Shimada K. Improvement of kinematically redundant manipulator design and placement using torque-weighted isotropy measures. In: Proceedings of the 14th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2009), Piscataway, USA, 2009
- [9] Yamazaki K, Tomono M, Tsubouchi T. Motion planning for a mobile manipulator with several grasping postures. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Piscataway, USA, 2006. 1077-1082
- [10] Zacharias F, Borst C, Hirzinger G. Capturing robot workspace structure; representing robot capabilities. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Piscataway, USA, 2007. 3229-3236
- [11] Ruehl S W, Hermann A, Zhixing X, et al. Graspability: a description of work surfaces for planning of robot manipulation sequences. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Piscataway, USA, 2011. 496-502
- [12] Berenson D, Kuffner J, Choset H. An optimization approach to planning for mobile manipulation. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (The Half-Day Workshop on: Towards Autonomous Agriculture of Tomorrow), Piscataway, USA, 2008. 1187-1192
- [13] Richards D, Paul G D, Webb S S, et al. Manipulator-based grasping pose selection by means of task-objective optimisation. In: Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA 2010), Brisbane, Australia, 2010. 1-9
- [14] Monastero A, Fiorini P. Target pose computation for non-holonomic mobile manipulators. In: Proceedings of the 14th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2009), Piscataway, USA, 2009. 1-8
- [15] Liegeois A. Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1977, 7(12): 868-871
- [16] Lavelle S M. Rapidly-exploring random trees: a new tool for path planning. Computer Science Department, Iowa State University, 1998

Optimization of platform placement and motion planning for mobile manipulators

Du Bin, Zhao Jing

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,
Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract

In view of the issue that the placement of the platform of a mobile manipulator has a great influence on whether the manipulator can perform a given task, the optimization of the platform placement was studied. Firstly, the workspace of a redundant manipulator was investigated, and the manipulation capability of the redundant manipulator was maximized based on the manipulability index through the joint self-motion of the redundant manipulator. Secondly, the maximum manipulation capability at the specified work point was determined. Thirdly, the relative manipulability index (RMI) was defined by analyzing the manipulation capability of the manipulator in its workspace, and the global manipulability map (GMM) was presented based on the above analysis. Moreover, the optimal platform placement related to the given task was determined, and motion planning was implemented by an improved rapidly-exploring random trees (RRT) algorithm, which can enhance the manipulation capability from the initial point to the target point. The feasibility of the proposed algorithm was illustrated with numerical simulations on the mobile manipulator.

Key words: mobile manipulator, self-motion, heuristic index, manipulability, rapidly-exploring random trees (RRT)