

在机器人的控制中自动绕过 机械干涉区的策略和算法

吴芳美

(上海铁道学院)

摘 要

本文定义了绞接机械系统(AMS)的绞接变量相关空间及绞接件间机械干涉区(MIZ),给出了一个机械干涉区几何模型,提出运动可行性检测和自动绕过机械干涉区的策略和算法,以期提高绞接机器人系统的自动化控制程度。

在机器人的控制中,机器人绞接臂每一个绞接件的运动除了受到外界环境的约束外,还将受到系统自身的限制。这种限制不光来自各自由度传动机具的结构和工艺及设计允许的动程,还和其他绞接件的位置相关,后者就是系统不同绞接件间的机械干涉问题。

由于机械干涉问题的存在,影响了机器人绞接臂的平滑运动和系统自动化控制程度的提高。

本文着重阐明机械干涉区(Mechanical Interference Zone,以下简称MIZ)的概念,并提出一种能对其进行形象描述的空间模型。在这个基础上讨论了系统运动可行性检测并自动绕过MIZ的策略和算法。

一、MIZ 定 义

定义 1. 具有 n 个转动或移动自由度的绞接机器人系统,描述该系统几何构形的 n 维空间,在不考虑机械干涉的假定情况下,称为系统的绞接变量相关空间,记作 Ω 。空间 Ω 上的每一个点代表系统的一个构形 \mathbf{s} ,它是各自由度绞接变量 θ 组合的一个 n 维向量,可表示为

$$\mathbf{s} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_n),$$

式中 θ_i 为第 i 个自由度的绞接变量^[1,2]。

定义 2. 由于机械干涉的存在,绞接机械系统(Articulated Mechanical System,以下简称AMS)中那些代表在绞接变量相关空间 Ω 上无法实现几何构形的点的集合称为机械干涉区(MIZ),记作 $\Omega_I, \Omega_I \subset \Omega$ 。

例如图 1 所示的具有两个自由度的 AMS 机动示意图(图 1(a)),它的 Ω 是一个以自

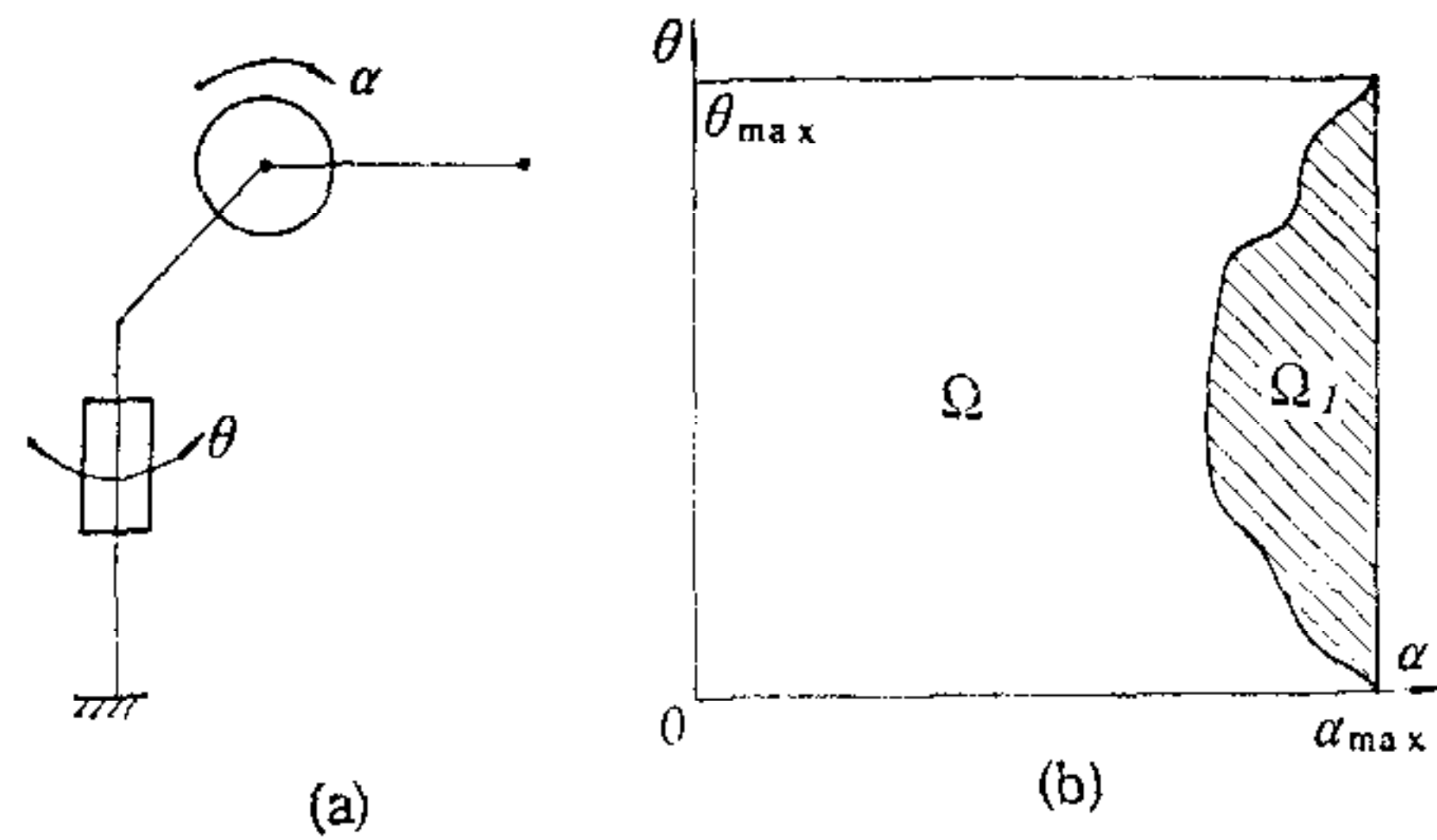


图 1

由度 α 、 θ 的动程 $0\alpha_{\max}$ 和 $0\theta_{\max}$ 为边的矩形。 Ω_I (影线部分) 是两自由度之间的 MIZ (图 1(b))。

系统执行一个任务,就是完成从初始构形 s_d 向最终构形 s_f 的转换。显然在实现转换的运动过程中,如果遇到 MIZ,就要重新设计运动路径,以实现绕过 MIZ 的运动。但是当 s_f 被要求在 MIZ 内部,则该运动不可行。

二、系统运动可行性检测与自动绕过 MIZ 的策略和算法

按照定义,首先可以根据系统结构生成一个 MIZ 模型,其目的是以一个比较易于处理的几何模型来表征 MIZ。例如在二维时,可以用一个 MIZ 的外包多边形;在三维时,用一个包围 MIZ 的多面体或表面小平面化了的球体(或球体群)。模型可以人工生成或通过计算机自动生成。实现算法所需的时间和模型的精度与多边形的边数或多面体的面数及边数直接相关,一般时间随边(面)数目的增多而加长,精度则随数目的增加而提高^[3]。

建立了 MIZ 的模型以后,处理策略如下。让绞接臂执行一个任务,即控制它从 s_d 向 s_f 运动。运动的可行性控制需首先作如下检测:

- (a) 从 s_d 至 s_f 的运动直线路径是否同 MIZ 相交;
- (b) s_f 是否在 MIZ 内部。

如果(a)检测的结果是“相交”的,应该使用一个改变路径的策略和算法,自动产生一个绕过 MIZ 的路径。如果(b)检测结果是肯定的,则该项任务中要求的运动不可行。只有在增加了新的自由度后才有可能。

1. 二维情况的分析

如果仅考虑 AMS 中的两个自由度之间的机械干涉而假定其他自由度处在固定不动位置时,根据设计制造者提供的干涉区图,生成干涉区模型——一个包围干涉区的多边形。相对于一个参考坐标系 R_0 ,多边形各顶点的坐标、 s_d 和 s_f 的坐标是已知的和已被贮存的。首先检测线段 $s_d s_f$ 是否切割多边形。如不切割,则检测结束后,维持原运动轨迹;否则通过线段 $s_d s_f$ 和多边形棱边交点数目的奇偶判定,确定 s_f 是否多边形内。

2. 三维情况的分析

三个自由度之间的 MIZ 是三维空间体。用多面体或球体表征它,就将问题简化为欧几里德空间对线性元素(点、直线、线段、平面、多边形)间的处理问题,显然很易于对它们进行数字和逻辑处理。通过检测运动始、终点间线段与多面体每个面之间的相交与否及

对交点数的奇偶判定,可以得知线段是否穿越干涉区及运动终止点是否在干涉区内部。

当确定 $s_d s_f$ 穿过干涉区时,要自动选定绕过 MIZ 的路径经由的若干中间点及经由这些点的顺序。这样新的能绕过 MIZ 的路径便产生了^[3]。二维情况可以被看作是三维的一个特例。

3. 算法

(1) 二维空间运动始、终点间的线段与干涉区关系的检测可以归结为两线段间的相交问题。图 2 中 MIZ 用多边形 abcde 表征。运动始点为 M, 终点为 N, MN 是否穿过 abcde 是通过 MN 与多边形每个棱边相交与否的检测实现的。设两线段分别为

为 $A(x_1, y_1) B(x_2, y_2)$ 和 $C(x'_1, y'_1) D(x'_2, y'_2)$ 。包括线段的直线方程组为

$$\begin{cases} \frac{y - y_1}{x - x_1} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \\ \frac{y' - y'_1}{x' - x'_1} = \frac{y'_2 - y'_1}{x'_2 - x'_1}. \end{cases}$$

解方程组求交点 $H(x_h, y_h)$ 坐标。 $y = y' = y_h, x = x' = x_h$ 。

当且仅当

$$x_h \in (x_1, x_2) \text{ 和 } x_h \in (x'_1, x'_2),$$

或

$$y_h \in (y_1, y_2) \text{ 和 } y_h \in (y'_1, y'_2)$$

成立,两线段相交。

为减少在线执行算法的时间,可先检测多边形相邻顶点是否在 MN 所在直线的两侧,仅求解那些相邻顶点在 MN 两侧的棱边与 MN 的交点,而相邻顶点在 MN 同侧的棱边与 MN 不相交。

计数 MN 与多边形棱边相交的交点数并作奇偶判定,来完成终点 N 是否在 MIZ 内的检测。当交点数为奇数时,说明 N 在 MIZ 内;为偶数时,在 MIZ 外。

为确保在各种特殊情况下,均能通过交点数的奇偶判定来检测运动的可行性,累计交点数时要根据规定的一系列准则来加以取舍。

经检测判定了运动始、终点间线段确实穿过干涉区后,需要取一条绕过干涉区的运动轨迹,如图 2 中所示的 $MabN$ 折线。因此必须选取轨迹经由的中间点和经由中间点的顺序。要判定从 M 到 N 第一个和最后一个与 MN 相交的棱边。可以采用折半查找法或排序法,这里选用排序法,将 MN 与棱边的交点 $H_1, H_2 \cdots H_i$ 以及 M、N 在 x 坐标(或 y 坐标)上排序。当出现等值情况时,改在 y 坐标(或 x 坐标)上排序。与 M 相邻交点所在棱边为第一个与 MN 相交的边,与 N 相邻的点所在的边为最后相交的边。图 2 所示的情况下, M、N 与交点 H_1, H_2 排序,从小到大为 $M-H_1-H_2-N$ 。与 M 相邻的 H_1 所在棱边 ea 为第一个与 MN 相交的边, bc 为最后一个。

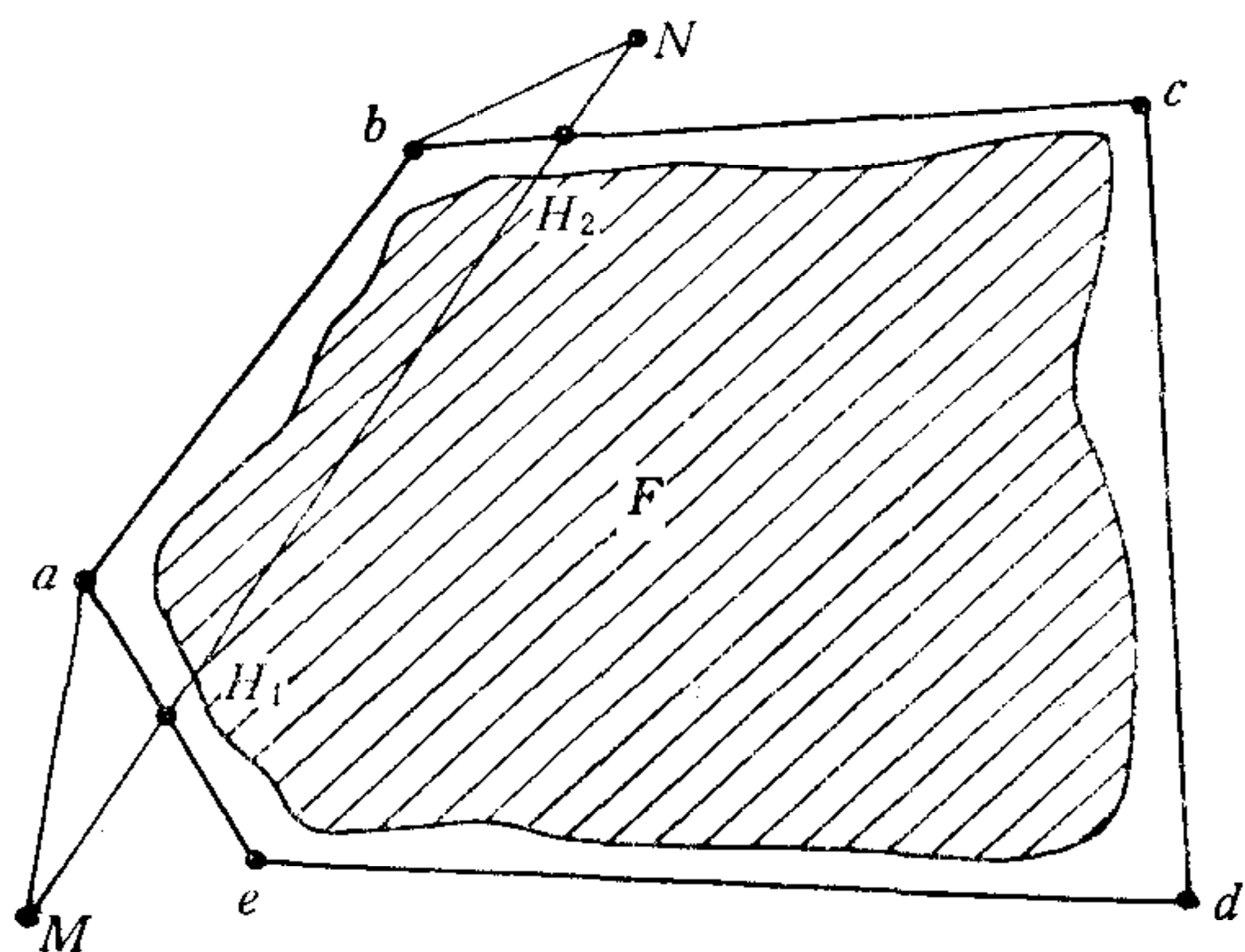


图 2

可以把多边形的顶点作为绕过 MIZ 的中间点. 对于没有特殊长的尖角的多边形, 计算在 MN 两侧多边形顶点数目, 选数目较少一边的顶点作为运动的中间点. 顺序从第一个与 MN 相交的棱边端点开始, 按多边形顶点命名顺序(或逆序)确定经由中间点的顺序. 图 2 中, 中间点为 a、b, 顺序是 $M \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow N$. 也可以计算 MN 两侧经由多边形顶点的实际距离或计算 MN 两侧能绕过干涉区的距离 (不一定要经过每个顶点), 选距离短的一侧取之.

(2) 三维空间运动始、终点间线段与干涉区的关系是由该线段与多面体每一个面(多边形)的相交检测来确定的. 一线段 A 与一个平面 Π 的相对位置如图 3(a) 所示, 图中 F 为 Π 上的一个多边形. A 所在的直线和 Π 是否存在交点由解直线和平面的联立方程判定. 当存在交点 H 时, 还需判定 H 的位置. 如果 $H \in (A', A'')$ 成立, 则 H 在线段 A 上, 否则线段与平面不相交. 若 H 在 A 上, 尚需判定 H 是否在多边形 F 内. 可以从 H 在 Π 上做任一射线, 检测此射线与 F 每一棱边的相交. 如果相交边数为奇数, 则交点在 F 内, 于是 A 与 F 相交, 如果相交边数为偶数或零, H 在 F 外, A 与 F 不相交.

为了简化问题和减少在线实现算法的时间, 利用了两套坐标系, 一个是如前述的参考坐标系 R_0 , 另一组为与多面体面数相等的坐标系 R_i , 它们中每一个的一个坐标平面, 例如 $x_i O_i y_i$, 与多面体的一个面相叠合, 如图 3b 所示. 多面体的一个编号为 1 的面 abcd 叠合在与其相联系的坐标系 R_1 的坐标平面 $x_1 O_1 y_1$ 上. 多面体各顶点、M、N 在 R_0 中的坐标为已知和已被贮存, 可脱机地将多面体每个面的顶点坐标通过雅可比矩阵从 R_0 变换到与之相联的坐标 R_i 中. 例如:

$$x_a(R_0) \rightarrow x_a(R_1), y_a(R_0) \rightarrow y_a(R_1) \dots$$

在 R_i 中, $z_a = z_b = z_c = z_d = 0$.

在检测 MN 与多边形的相交时, 在线地首先将 M、N 的坐标由 R_0 变换到 R_i 中.

如果 $z_M(R_1) > 0$ 和 $z_N(R_1) > 0$,

或 $z_M(R_1) < 0$ 和 $z_N(R_1) < 0$,

则 MN 与多边形 1 不相交, 否则可解包含 MN 的直线和包含多边形的平面的联立方程来求交点. 在 R_i 坐标系中, 方程简化为

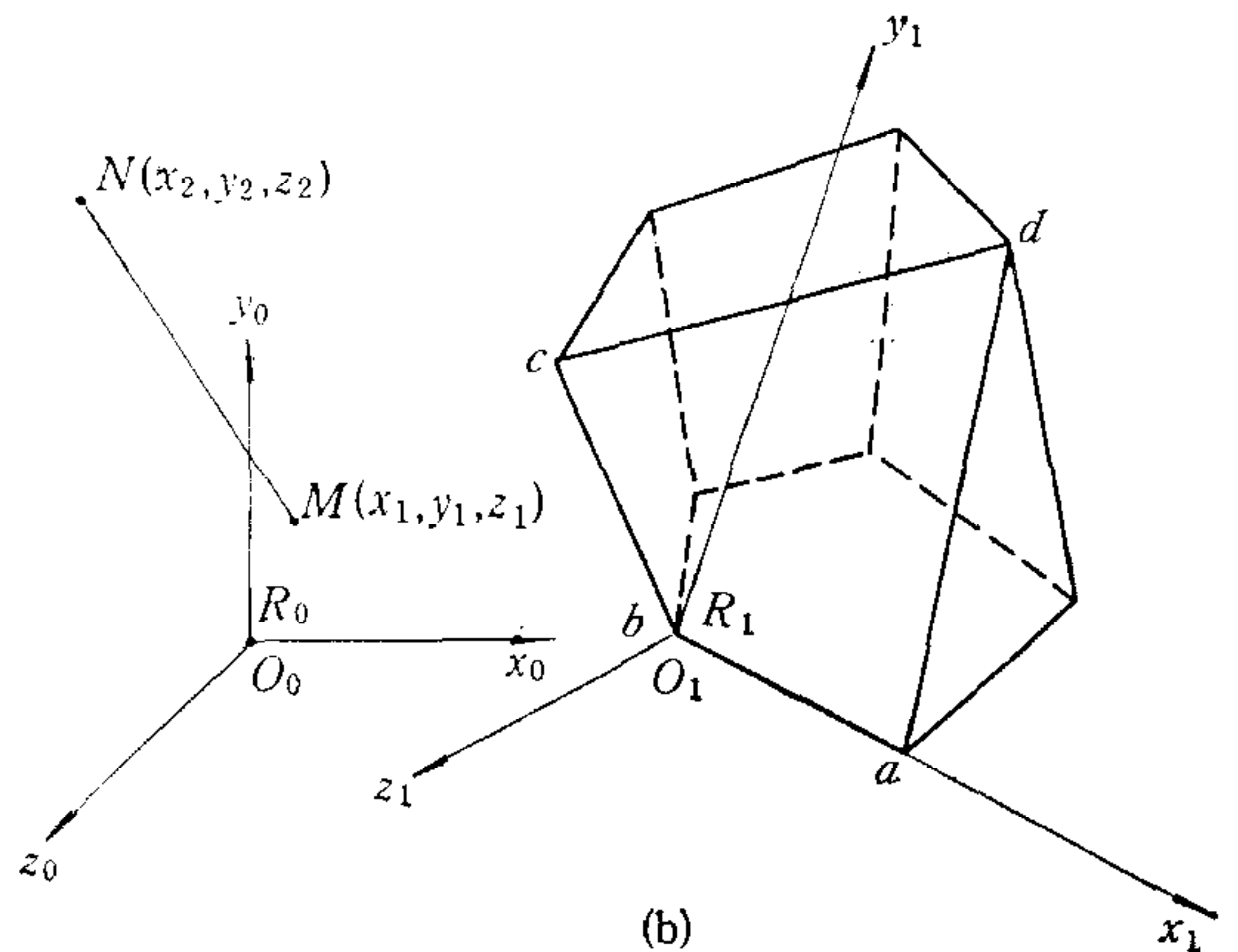
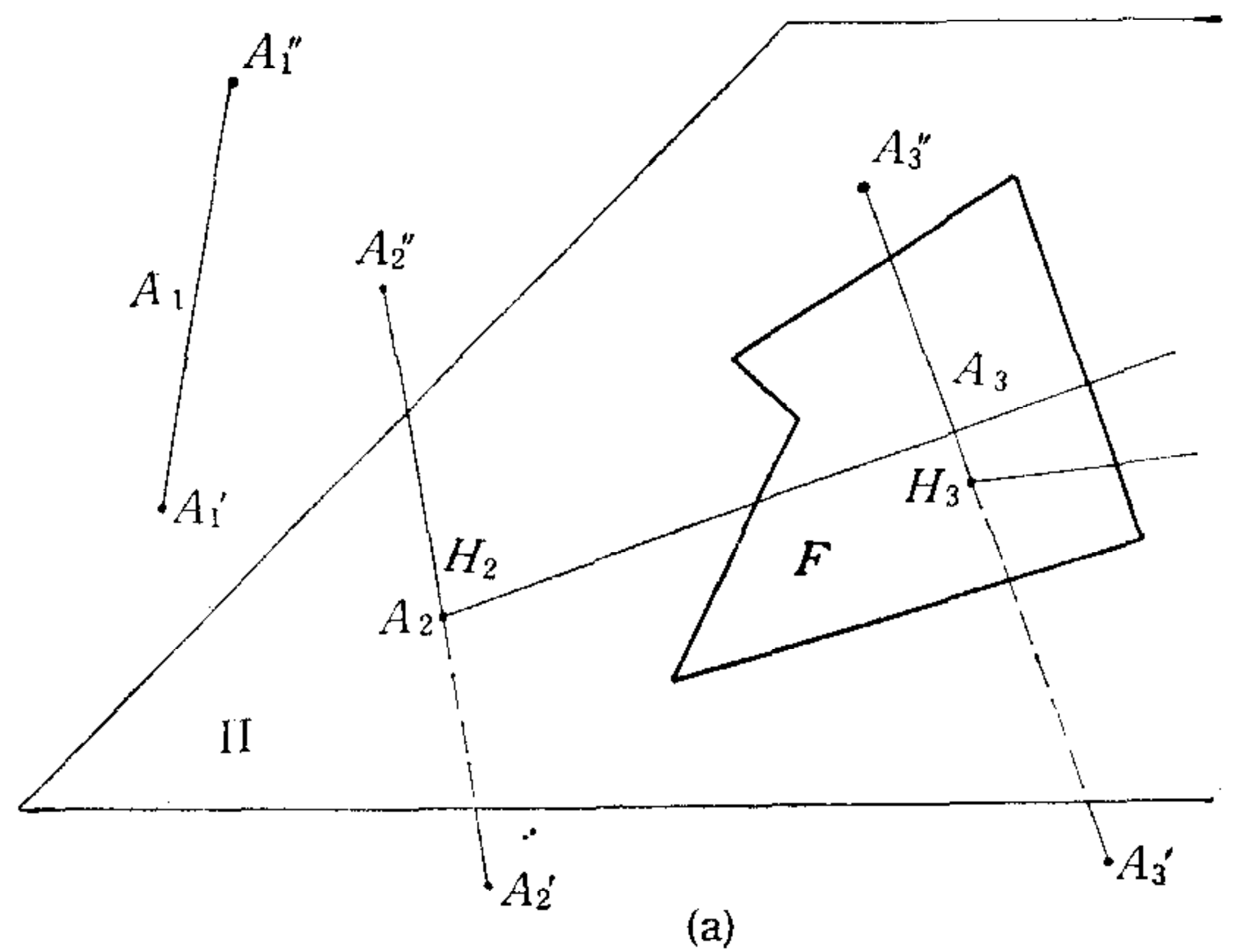


图 3

$$\begin{cases} \frac{x - x_M}{x_N - x_M} = \frac{y - y_M}{y_N - y_M}, \\ \frac{x - x_M}{x_N - x_M} = \frac{z - z_M}{z_N - z_M}, \\ z = 0. \end{cases}$$

余下算法如前述,算法组织见图 4a.

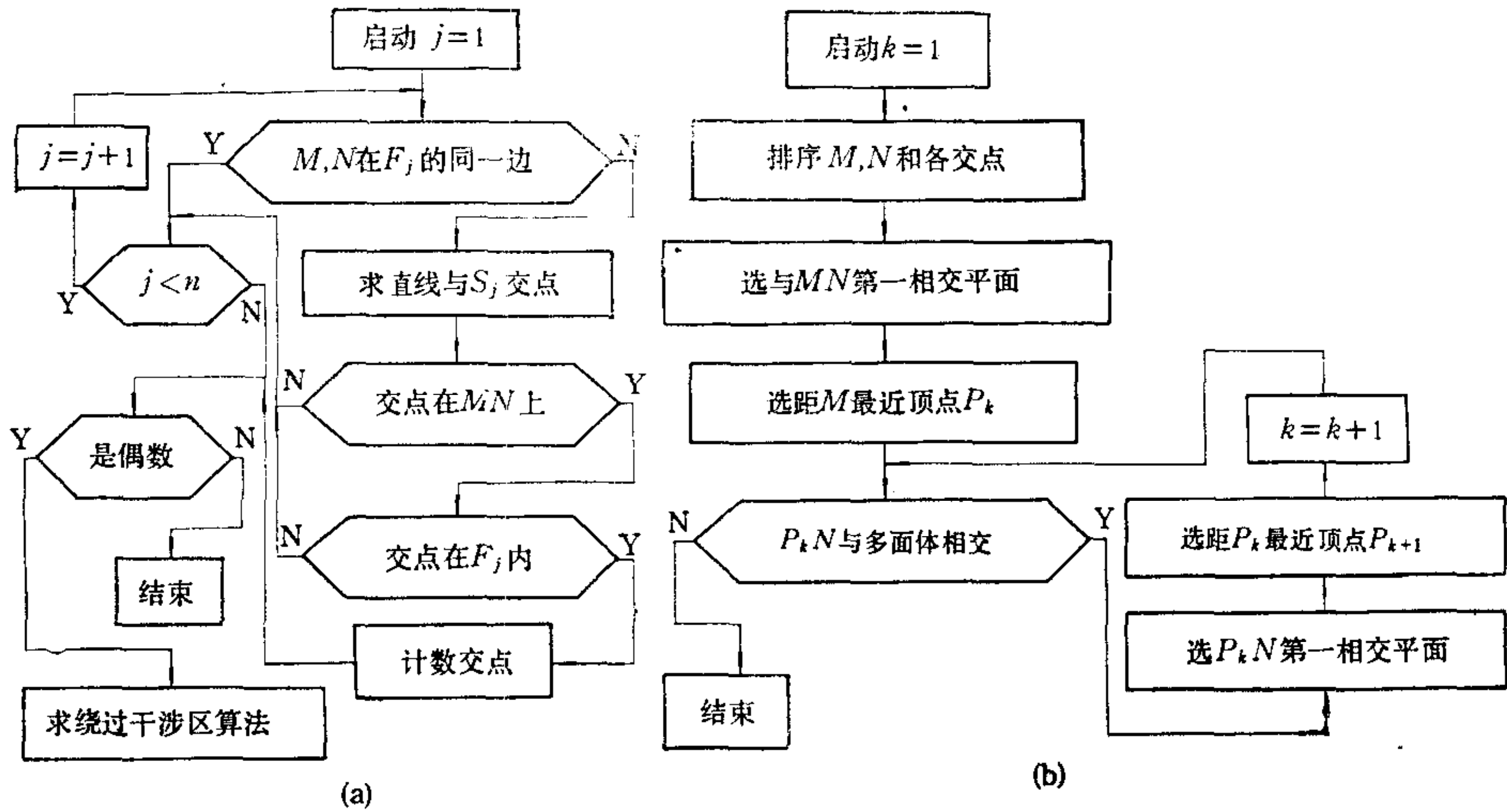


图 4

确定了 MN 确实穿过 MIZ 后,产生绕过 MIZ 的轨迹同样是选择经由的中间点和确定经由这些点的顺序问题,用排序法将 M、N 和交点排序. 与 M 相邻交点所在的面为从 M 到 N 与多面体相交的第一个面,可选取第一个相交面上距 M 最近的顶点作为第一个中间点 P₁,然后检测 P₁N 与多面体的相交. 如果没有交点,仅经由 P₁ 到 N 即可绕过 MIZ; 否则再找出 P₁N 与多面体第一个相交的面,选取第一交面上距 P₁ 最近的顶点作为经由的第二个中间点 P₂. 接下来检测 P₂N 与多面体的相交,如果没有交点,仅选取 P₁、P₂ 两个中间点,否则重复上述过程. 算法组织见图 4(b).

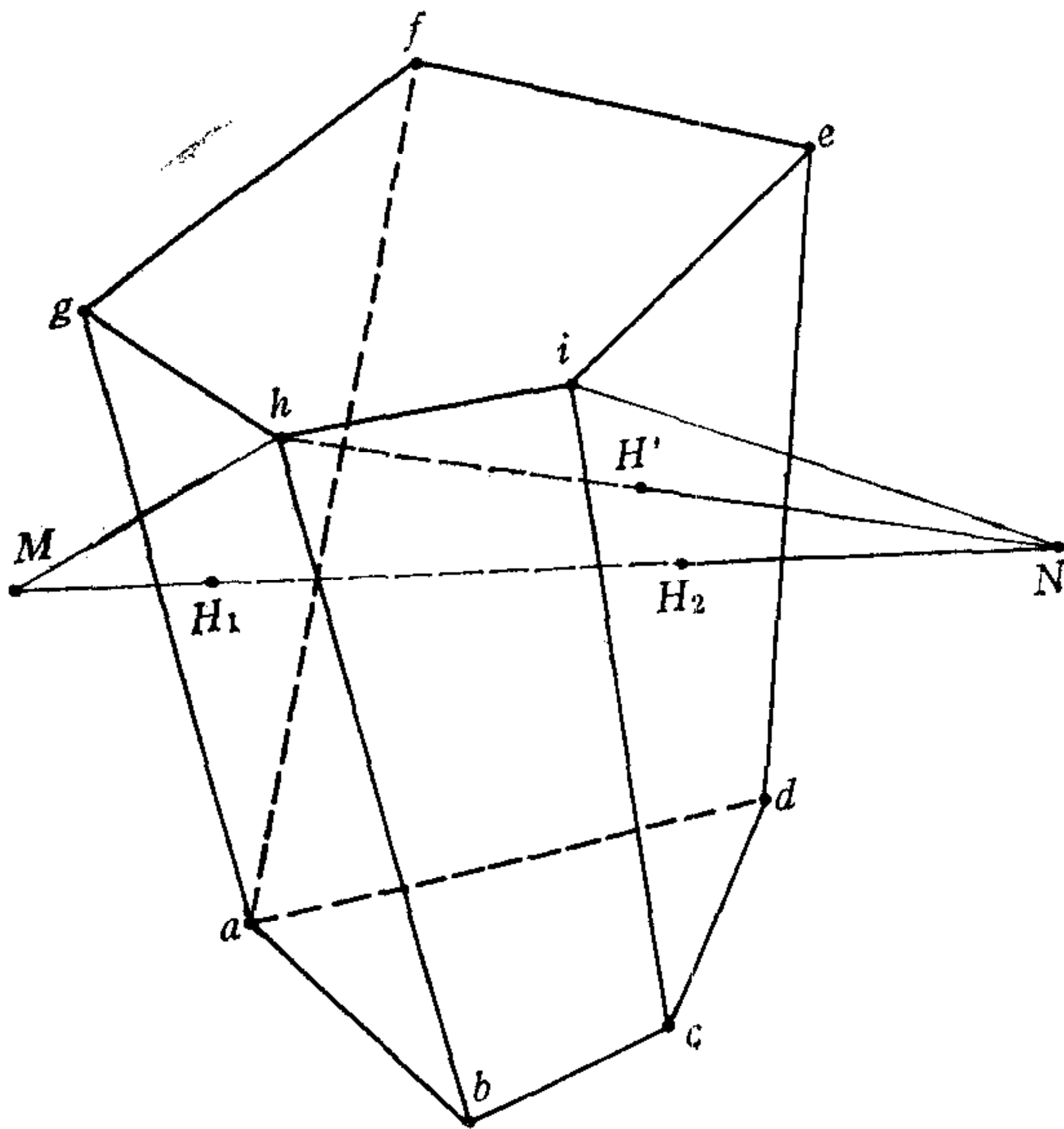


图 5

面 abhg 为从 M 到 N 第一个相交的面. 比较 Ma、Mb、Mh、Mg, 最短线段为 Mh, 故选取 h.

在图 5 所示的例子中, MN 与多面体的面有两个交点 H₁、H₂, 经排序从小到大为 M—H₁—H₂—N, 则 H₁ 所在的面 abhg 为从 M 到 N 第一个相交的面. 比较 Ma、Mb、Mh、Mg, 最短线段为 Mh, 故选取 h.

在图 5 所示的例子中, MN 与多面体的面有两个交点 H₁、H₂, 经排序从小到大为 M—H₁—H₂—N, 则 H₁ 所在的面 abhg 为从 M 到 N 第一个相交的面. 比较 Ma、Mb、Mh、Mg, 最短线段为 Mh, 故选取 h.

为第一个中间点. 检测 hN 与多面体的相交, 仅与面 $cdei$ 有交点 H' . 比较 hi, he, hc, hd , 最短线段为 hi , 取 i 为第二个中间点. 经检测 iN 与多面体不相交, 确定绕过 MIZ 的轨迹为 $M \rightarrow h \rightarrow i \rightarrow N$.

不论二维或三维干涉区模型, 任何两顶点之间能绕过它的最短路径及经由的中间点和经由顺序均可事先以表格的方式贮存. 当在线计算确定了第一个和最后一个中间点后, 利用查表即可得到绕过 MIZ 的最短路径.

三、讨 论

从二维和三维情况的分析可知, 实现运动可行性检测和自动绕过 MIZ 的算法所需的时间是随维数的增加而增加的. 但是实际的机器人系统有时存在着一些自由度, 它们之间不存在机械干涉. 把这些自由度去除, 则需要加以考虑的 MIZ 的维数 n' 并不总等于系统的自由度数 n , 一般存在 $n' \leq n$ 的关系. 因此在工程上除了进一步直接研究解决大于三维自动绕过 MIZ 的可行算法外, 还可以考虑有条件地把系统分为若干个现有算法可解的子系统, 实现多自由度 AMS 自动绕过 MIZ.

本文阐述的工作是作者在法国里昂国家应用科学学院进修期间完成的, 在此对 J.J. Schwarz 先生的指导表示感谢.

参 考 文 献

- [1] Coiffet, P., *Les Robots*, Hermes Publishing (1981, France), Tome 1, ch. 1—2.
- [2] Lopez, P. et Foulc, J-N., *Introduction à la Robotique*, Editests (1984, France), ch. 1.
- [3] Marcé, L., Jullière, M., et Place, H., *Stratégie de Contournement d'obstacles pour un Robot Mobile*, R. A. I. R. O., Vol. 15, No. 1, (1981).
- [4] E. П. 波波夫等著, 遇立基等译, *操作机器人动力学与算法*, 机械工业出版社 (1983), 第三、五章.
- [5] Hermeline, F., *Triangulation Automatique d'un Polyèdre en Dimension N*, R. A. I. R. O., Vol. 16, No. 3, (1982).

THE STRATEGIES AND ALGORITHMS FOR AUTOMATICALLY ROUNDING THE MECHANICAL INTERFERENCE ZONE IN ROBOT CONTROL

WU FANGMEI

(Shanghai Institute of Railway Technology)

ABSTRACT

In this paper, a relational space of articulated variates and the Mechanical Interference Zone (MIZ) between the articulators of Articulated Mechanical System (AMS) are defined. A geometric model for MIZ is shown. To improve the automatization of robotic system control, some strategies and algorithms for verifying the movement feasibility and automatically rounding the MIZ in AMS are presented.