

地面目标跟踪中的道路识别¹

王建国 何佩琨 韩月秋 刘先省

(北京理工大学电子工程系 北京 100081)

摘要: 针对地面目标跟踪中的道路识别问题研究了一种快速有效的实现方法,建立了道路识别问题的数学模型并将上述问题与一个不等式约束的正定二次规划问题相联系,给出了二次规划问题的最优性条件并提出了一种基于有效集算法的道路识别方法,通过两个不同的仿真实例验证了上述算法的可行性和有效性。

关键词: 地面目标跟踪, 道路识别, 二次规划

中图分类号: TN953 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)07-1144-06

Road Identification in Ground Target Tracking

Wang Jian-guo He Pei-kun Han Yue-qiu Liu Xian-xing

(Dept of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract A fast effective algorithm is developed for the road identification problem in ground target tracking. A mathematic model of road identification problem is provided and the problem is related with a positive definite quadratic programming problem with inequality constraints. The optimality conditions are given and a road identification method based on active set algorithm is proposed. The two different simulation examples verify the feasibility and efficiency of the above algorithm.

Key words Ground target tracking, Road identification, Quadratic programming

1 引言

在地面目标跟踪中道路约束条件是最具吸引力的地形信息,文献 [1-4] 显示了合理利用道路信息带来的性能改善。但是,使用道路信息的一个重要前提就是必须首先识别出目标所在的道路段。文献 [1-3] 提出可以通过检查以目标预测位置为中心的椭圆是否跟道路段存在重叠来确定,并指出这种方法类似于数据关联中常用的测量有效性检验。然而这种方法远没有测量有效性检验那么简单,因为测量数据总是有限的,而定义在道路区域上的点却是无限的。逐一检查道路区域内的点是否满足道路有效性条件显然是不切实际的,特别是在要求实时实现的场景中。文献 [4] 提出的方法与文献 [1-3] 相类似,同样难于实时实现。

本文的目的是针对地面目标跟踪中的道路识别问题提出一种快速有效的实现方法。第 2 节将给出道路识别问题的数学描述;第 3 节建立道路识别问题与一个不等式约束的正定二次规划问题的关系;第 4 节讨论有效集算法及其修正。第 5,第 6 节分别通过实例验证上述算法的可行性和有效性并给出有关结论。

2 问题描述

2.1 目标定位

在实际的跟踪场景中,目标的位置往往通过其预测值或者测量值以及对应的误差协方差来描述。假定目标的位置矢量和误差协方差矩阵分别为 ξ_T 和 P ,则目标将出现在以下不等式描

¹ 2003-01-15 收到, 2003-07-21 改回
国家自然科学基金资助课题 (60272024)

述的区域内

$$(\xi - \xi_T)^T \mathbf{P}^{-1} (\xi - \xi_T) \leq \alpha \quad (1)$$

其中 α 为置信门限。 \mathbf{P} 为对称正定矩阵, 因此 \mathbf{P} 可以分解为

$$\mathbf{P} = \mathbf{U} \text{diag}\{\lambda_1(\mathbf{P}), \lambda_2(\mathbf{P})\} \mathbf{U}^T, \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 $\lambda_i(\mathbf{P}), i = 1, 2$ 为矩阵 \mathbf{P} 的特征值, φ 为与 $\lambda_1(\mathbf{P})$ 对应的特征矢量的方向。定义

$$[\tilde{x}' \quad \tilde{y}']^T = \mathbf{U}(\xi - \xi_T) \quad (3)$$

显然 \tilde{x}', \tilde{y}' 就是坐标系旋转 φ 角后的定位误差, 它们的方差分别为矩阵 \mathbf{P} 的两个特征值。利用式 (3) 可以把式 (1) 重写为

$$\{(\tilde{x}')^2 / [\alpha \lambda_1(\mathbf{P})] + (\tilde{y}')^2 / [\alpha \lambda_2(\mathbf{P})]\} \leq 1 \quad (4)$$

式 (4) 定义了一个椭圆区域, 其中心位置为 ξ_T , 半轴的长度分别为 $[\alpha \lambda_1(\mathbf{P})]^{1/2}$ 和 $[\alpha \lambda_2(\mathbf{P})]^{1/2}$, 每个半轴与对应坐标轴的夹角为 φ 。

2.2 道路网

道路网中的每一段道路可以由道路中心线的两个端点以及道路的宽度定义。假定某一段道路中心线的两个端点分别为 ξ_S 和 ξ_E , 则道路的长度为

$$L = [(\xi_E - \xi_S)(\xi_E - \xi_S)^T]^{1/2} \quad (5)$$

道路中心线与 x 轴的夹角即道路的方向用 ψ 表示, 则有

$$[\cos \psi \quad \sin \psi]^T = (\xi_E - \xi_S) / L \quad (6)$$

中心线端点分别为 ξ_S 和 ξ_E 、宽度为 W 的矩形区域, 即道路区域可以描述为

$$\mathbf{A}^T \xi < \mathbf{b} \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & -\cos \psi & \sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi & -\sin \psi & -\cos \psi \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{b} = (1/2) \{ \mathbf{A}^T (\xi_S + \xi_E) + [L \quad W \quad L \quad W]^T \} \quad (9)$$

确定目标所在的道路区域就是确定式 (1) 所描述的椭圆区域和式 (7) 所描述的矩形区域是否存在重叠。一种最为直接的方法就是逐一检查每个点是否同时满足式 (1) 和式 (7), 显然这种方法无法实时实现。

3 道路识别算法设计

为了给出一种快速有效的算法, 本节首先给出一个正定二次规划问题^[5], 然后考察上述道路识别问题与这个二次规划问题之间的关系。定义二次函数:

$$Q(\xi) = (\xi - \xi_T)^T \mathbf{P}^{-1} (\xi - \xi_T) \quad (10)$$

则以式 (7) 为约束条件、以 $Q(\xi)$ 为目标函数的一个二次规划问题为

$$\min Q(\xi) = (1/2)\xi^T H\xi + g^T \xi + c \quad (11)$$

$$\text{s.t.} \quad A^T \xi \leq b \quad (12)$$

其中

$$H = 2P^{-1}, \quad g = -H\xi_T, \quad c = (1/2)\xi_T^T H\xi_T \quad (13)$$

易知上述二次规划问题存在最优解 ξ^* , 该最优解 ξ^* 对应的目标函数值为

$$\alpha^* = Q(\xi^*) \quad (14)$$

注意到上述二次规划问题的目标函数就是式 (1) 的左端表达式, 考察上述两个问题可以得出以下重要结论:

(1) 如果道路区域与椭圆区域重叠, 则上述二次规划问题必然存在一个可行解 ξ' 满足

$$\alpha^* \leq Q(\xi') \leq \alpha \quad (15)$$

(2) 如果道路区域与椭圆区域未重叠, 则上述二次规划问题的最优解 ξ^* 满足

$$\alpha^* = Q(\xi^*) > \alpha \quad (16)$$

上述结论表明, 如果能找到一个可行点满足式 (15) 则道路区域与椭圆区域重叠。否则, 必然可以通过二次规划算法得到二次规划问题的最优解, 该最优解满足式 (16), 此时道路区域与椭圆区域无重叠。

4 有效集算法及修正

目前不等式约束的二次规划算法都是以迭代为基础的。其中一类算法称为可行点算法, 这类算法从一个可行点开始, 通过迭代步骤进入另一个可行点, 其目标函数则单调递减, 从而可以最终达到最优解。显然这一类算法更为适合解决本文的问题, 因为我们并不特别关心最优解, 而更为关心是否存在满足式 (15) 的可行解。如果不存在上述可行解则必然存在最优解满足式 (16)。有效集算法就是一个经典的可行点算法, 在介绍该算法之前首先给出上述二次规划问题的最优性条件。

4.1 最优性条件

为方便起见, 可以把矩阵 A 和矢量 b 重写为以下形式

$$A = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4], \quad b = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4]^T \quad (17)$$

对于上述正定二次规划问题, 可以证明以下定理:

定理 1 ξ^* 是问题式 (11-13) 的最优解, 当且仅当存在 $\lambda^* = [\lambda_1^* \ \lambda_2^* \ \lambda_3^* \ \lambda_4^*]^T$ 使得 (ξ^*, λ^*) 满足以下关系:

$$g + H\xi^* = A\lambda^* \quad (18)$$

$$a_i^T \xi^* \leq b_i, \quad i \in I \quad (19)$$

$$\lambda_i (a_i^T \xi^* - b_i) = 0, \quad i \in I \quad (20)$$

$$\lambda_i^* \leq 0, \quad i \in I \quad (21)$$

其中 $\lambda_i^*, i \in I$ 被称为拉格朗日乘子, $I = \{1, 2, 3, 4\}$ 为约束条件的指标集。

有效集算法在迭代过程中始终维持条件式 (18-20) 成立, 逐步满足式 (21) 中的所有条件, 从而最终达到最优解。

4.2 等式约束正定二次规划及其最优解

有效集算法从一个可行解到另一个可行解的迭代过程是通过解决有效约束指标集所定义的等式约束二次规划问题来实现的。为此, 必须给出等式约束二次规划问题及其最优解。

对于有效集算法迭代过程中的一个可行点 ξ_k , 可以定义一个等式约束的二次规划问题:

$$\min Q(\xi) \quad (22)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{a}_i^T \xi = b_i, \quad i \in I_k \quad (23)$$

$$I_k \triangleq \{i | \mathbf{a}_i^T \xi_k = b_i, i \in I\} \quad (24)$$

其中 I_k 称为有效约束指标集。由文献 [5] 可知, 上述问题的最优解 ξ_k^* 可以直接给出:

$$\xi_k^* = \xi_T + (1/2) \mathbf{P} \mathbf{A}_k \lambda_k^* \quad (25)$$

$$\lambda_k^* = 2(\mathbf{A}_k^T \mathbf{P} \mathbf{A}_k)^{-1} (\mathbf{b}_k - \mathbf{A}_k^T \xi_T) \quad (26)$$

$$\mathbf{A}_k = [\mathbf{a}_i]_{i \in I_k}, \quad \mathbf{b}_k = [b_i]_{i \in I_k}^T \quad (27)$$

4.3 修正的有效集算法

根据第 3 节的两个重要结论, 有效集算法经过以下修正即可直接用于道路识别: 对于有效集算法产生的每个可行点检验式 (15) 是否成立, 如果成立则确认道路并结束。如果算法终止于最优解, 则该最优解必然满足式 (16), 此时否认该道路。由此可以给出道路识别算法的主要步骤:

步骤 1 给出初始可行点 $\xi_0 = (1/2)(\xi_S + \xi_E)$; 如果 $Q(\xi_0) \leq \alpha$ 则确认道路并结束; 否则计算 I_0 , 令 $k = 0$, 转步骤 2;

步骤 2 根据指标集 I_k 利用式 (25-27) 计算 (ξ_k^*, λ_k^*) ; 计算可行性方向 $\mathbf{d}_k = \xi_k^* - \xi_k$; 如果 $\mathbf{d}_k = \mathbf{0}$ 则转步骤 3, 否则转步骤 4;

步骤 3 令 $(\xi_{k+1}, \lambda_{k+1}) = (\xi_k^*, \lambda_k^*)$, 如果 $Q(\xi_{k+1}) \leq \alpha$ 则确认道路并结束; 如果 $\lambda_{k+1} \leq 0$ 则否认道路并结束; 否则计算 $I_{k+1} = I_k - \{\arg \max_{i \in I_k} \lambda_i\}$, 转步骤 2;

步骤 4 计算 $s_k = \min \left\{ 1, \min_{\substack{i \in I - I_k \\ \mathbf{a}_i^T \mathbf{d}_k > 0}} \frac{b_i - \mathbf{a}_i^T \xi_k}{\mathbf{a}_i^T \mathbf{d}_k} \right\}$, 如果 $s_k = 1$ 则转步骤 3; 否则计算 $\xi_k = \xi_k + s_k \mathbf{d}_k$; 如果 $Q(\xi_k) \leq \alpha$ 则确认道路并结束; 否则计算 $I_k = I_k + \{j | \mathbf{a}_j^T \xi_k = b_j, j \notin I_k\}$, 转步骤 2。

4.4 迭代的有限性

为了满足实时处理的要求, 必须保证算法在有限次迭代后终止。上述算法的迭代过程只有 3 种可能情形: (1) 无约束情形: 此时可行点位于矩形道路区域的内部, 对应的最优解为 ξ_T ; (2) 单约束情形: 对应的等式约束分别为矩形区域边缘对应的直线方程, 有 4 种可能; (3) 双约束情形: 对应的等式约束分别为矩形区域两条相互垂直的边缘对应的直线方程, 有 4 种可能;

可知上述算法的迭代过程不可能超过 9 次。

5 仿真结果

为了验证上述算法的可行性和有效性, 考察以下两个典型实例, 如表 1, 表 2 所示。

表 2 求解过程

实例 1			实例 2		
次序	可行点	目标函数	次序	可行点	目标函数
0	(4085.0, 6075.0)	33.1052	0	(5075.0, 5085.0)	22.9897
1	(4056.9, 6050.2)	14.8244	1	(5049.2, 5055.8)	9.8905
2	(4016.2, 6003.3)	0.7388	2, 3	(5046.7, 5052.3)	8.8238

表 1 问题参数

	实例 1	实例 2
目标位置 (km)	(4, 6)	(5, 5)
方差 (λ_1, λ_2) (m^2)	(400, 225)	(576, 324)
方向 φ (rad)	$\pi/6$	$\pi/3$
道路起点 (km)	(4.02, 6)	(5.05, 5.05)
道路终点 (km)	(4.15, 6.15)	(5.10, 5.12)
道路宽度 (m)	10	8

上述实例的求解过程可以分别用图 1, 图 2 表示, 其中椭圆上的点目标函数值相同. 实例 1 的求解过程表明, 在矩形道路区域存在一个可行点 (4016.2, 6003.3), 其目标函数值 0.7388 小于置信门限 4.61, 从而判定目标椭圆区域与道路区域存在重叠; 实例 2 的求解过程表明, 在矩形道路区域内即使是最优点 (5046.7, 5052.3) 其目标函数值 (8.8238) 也远远大于置信门限 4.61, 因而可以判定目标椭圆区域与道路区域不可能重叠, 从而确定目标不可能位于道路上. 上述实例分别需要 2 次和 3 次迭代即可确定椭圆区域与矩形区域是否重叠, 不需要检查所有的可行点.

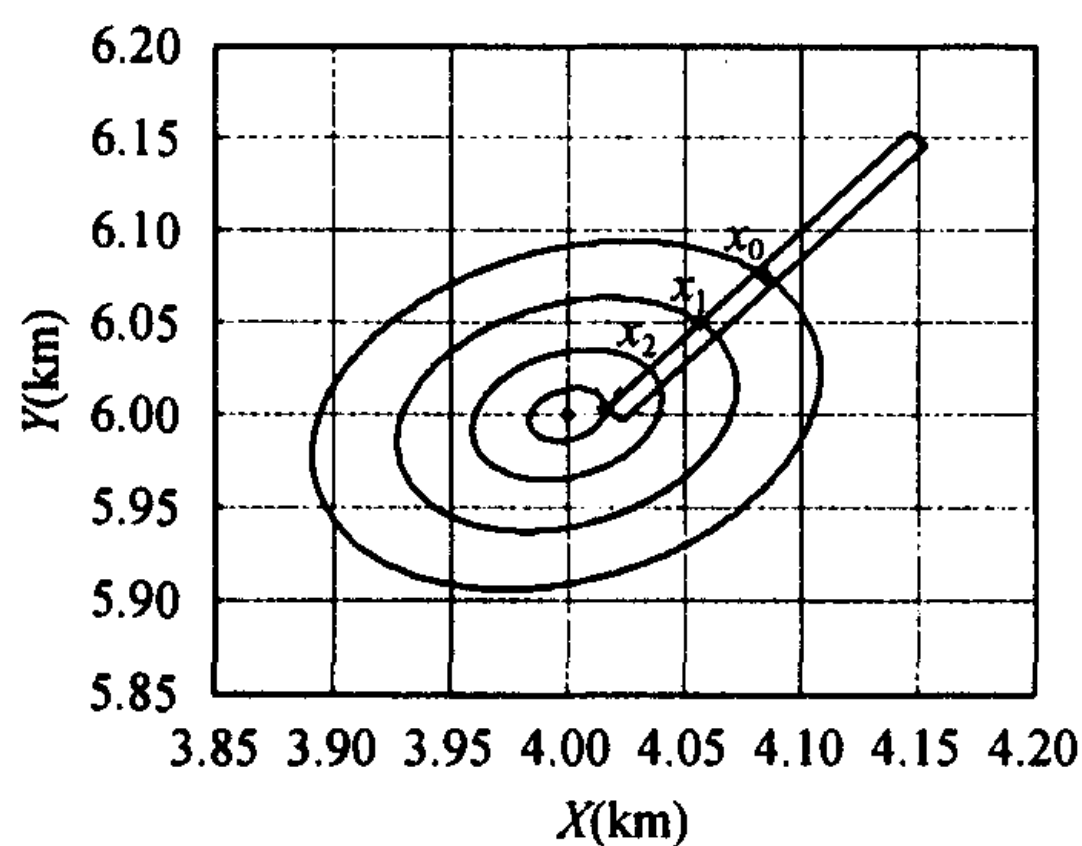


图 1 实例 1 求解过程

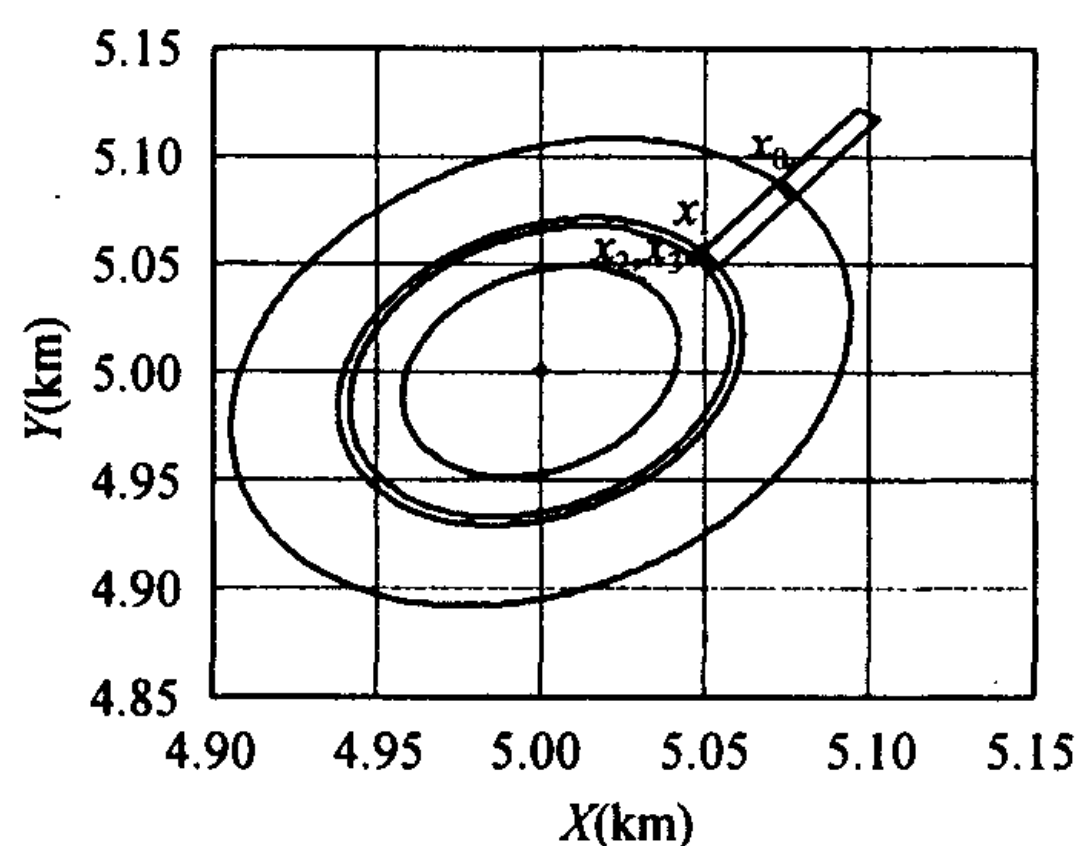


图 2 实例 2 求解过程

6 结论

本文根据地面目标跟踪的特点, 将地面目标跟踪中的道路识别问题与一个不等式约束的正定二次规划问题相联系, 给出了对应的约束方程和目标函数. 分析了上述问题的最优性条件, 根据问题的条件给出了一种修正的有效集算法, 并分析了算法迭代的有限性. 这种算法不需要检查道路区域内的所有点, 只需检查有限个可行点即可, 因而是一种快速有效的算法. 两个不同的仿真实例验证了上述算法的可行性和有效性.

参 考 文 献

[1] Kirubarajan T, Bar-Shalom Y, Pattipati K R, Kadar I, Abrams B, Eadan E. Tracking ground target with road constraint using an IMM estimator. Proceedings of IEEE aerospace conference, Snowmass at Aspen, CO, USA, 21-28 March, 1998: 5-12.

- [2] Kirubarajan T, Bar-shalom Y, Pattipati K R. Topography-based VS-IMM estimator for large-scale ground target tracking. *IEE colloquium target tracking: algorithms and applications*, London, UK, 11-12 Nov., 1999: 1-4.
- [3] Kirubarajan T, Bar-shalom Y, Pattipati K R, Kadar I. Ground target tracking with variable structure IMM estimator. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems*, 2000, AES-36(1): 26-46.
- [4] Chih-Chung Ke, Jesus Garcia Herrero, James Llinas. Comparative analysis of alternative ground target tracking techniques. *Proceedings of the Third International Conference on Information Fusion*, Paris, France, 10-13 July, 2000: 3-10.
- [5] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法. 北京: 科学出版社, 1997年1月, 第9章.

王建国: 男, 1975年生, 博士后, 主要研究方向: 多传感器多目标跟踪与信息融合.

何佩琨: 男, 1940年生, 教授, 主要研究方向: 雷达系统信号处理.

韩月秋: 男, 1936年生, 教授, 主要研究方向: 雷达系统信号处理.

刘先省: 男, 1964年生, 教授, 主要研究方向: 信息融合与阵列信号处理.