

实现目标跟踪的光纤传感网络及其优化设计

陈喜锋^{1,2} 王国利^{1,2} 郭雪梅^{1,2}

摘 要 研究了实现目标跟踪的光纤传感网络部署设计问题, 提出利用动态唯一可解码对感知空间进行编码, 从而指导光纤传感器的部署以感知运动目标位置信息的方法, 并基于蚁群算法提出了动态唯一可解码的优化设计方案. 结果表明形成的动态唯一可解码优化设计方案用于指导构建光纤传感网络能有效地减少所需部署的光纤长度.

关键词 光纤传感网络, 目标定位, 蚁群算法, 优化部署设计

引用格式 陈喜锋, 王国利, 郭雪梅. 实现目标跟踪的光纤传感网络及其优化设计. 自动化学报, 2014, 40(7): 1348–1354

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.01348

A Fiber Sensor Network and Its Optimization Design for Target Tracking

CHEN Xi-Feng^{1,2} WANG Guo-Li^{1,2} GUO Xue-Mei^{1,2}

Abstract This paper studies the issue of deployment design of a fiber sensor network for target tracking. The dynamic uniquely decipherable code scheme is employed to guide the fiber sensor deployment for target localization, and the ant colony algorithm is used to find the optimal deployment scheme. Experimental results show that the optimal deployment scheme can significantly reduce the length of fiber sensors required.

Key words Fiber sensor network, target localization, ant colony algorithm, optimal deployment design

Citation Chen Xi-Feng, Wang Guo-Li, Guo Xue-Mei. A fiber sensor network and its optimization design for target tracking. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(7): 1348–1354

目标跟踪是智能环境和人机交互研究领域的一个重要课题^[1–5], 也是基于位置服务和辅助生活等应用需要解决的基本问题之一^[6–10]. 本文研究光纤传感网络实现单目标的跟踪问题, 提出了利用动态唯一可解码指导布置光纤传感器的方法, 并基于蚁群算法提出了动态唯一可解码的优化设计方案.

光纤传感器不仅具有灵活弯曲的特点, 而且对压力和张力非常敏感, 能够准确地将敏感的状态信息以信号的形式输出, 目前已在压力物理量的环境检查中得到广泛的应用^[11–14]. 本文利用光纤传感器对压力敏感的特点, 将若干条光纤传感器布置在感知空间中, 构建出光纤传感网络, 当运动目标踩到布置在感知空间的光纤传感器时, 光纤传感器即可检测到变化的压力状态, 从而感知运动目标的位置信息, 对目标实现跟踪.

利用光纤传感网络实现目标跟踪, 其核心就是光纤传感器的部署. 文献 [15–16] 提出了复用光纤传感器对感知空间进行编码, 实现目标定位的思想, 其研究的关键就是将感知空间划分成多个区域, 并对各个区域进行单独编码, 使得各个区域的编码互不相同, 从而由编码与位置一一对应的关系确定出目标的位置. 然而, 运动目标在相邻时刻的位置是具有相关性的, 孤立地对单一区域进行编码将导致各区域的编码存在大量的冗余信息, 因此需复用较多条光纤传感器对感知空间进行编码. 本文在此基础上考虑了时间和空间的相关性, 提出了利用动态唯一可解码对感知空间进行编码, 从而指导布置光纤传感器的方法, 有效限制了编码的冗余信息, 进而减少了所需的光纤传感器数目, 提高了光纤传感器的感知效率. 与此同时, 本文考虑了动态唯一可解码指导构建光纤传感网络所需消耗的光纤传感器的长度问题, 建立了长度的组合优化模型. 鉴于蚁群算法在求解离散的复杂组合优化问题上有优异的表现^[17–19], 能够很快地发现较好解^[20–23], 本文基于蚁群算法提出了动态唯一可解码的优化设计方案, 减少了所需的光纤传感器长度, 使得布置在感知空间的光纤传感器长度最短. 这对节约能源、减小成本和降低系统设计复杂度等方面都具有重大的意义.

在第 1 节, 提出利用动态唯一可解码对感知空间进行编码, 从而指导光纤传感器部署的方法, 并给

收稿日期 2013-09-05 录用日期 2013-12-16
Manuscript received September 5, 2013; accepted December 16, 2013

国家自然科学基金 (61375080, 61074167), 广东顺德中山大学卡内基梅隆大学国际联合研究院自由申请项目 (20130201) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61375080, 61074167) and Free Project of SYSU-CMU Shunde International Joint Research Institute (20130201)

本文责任编辑 关新平

Recommended by Associate Editor GUAN Xin-Ping

1. 中山大学信息科学与技术学院 广州 510006 2. 广东顺德中山大学卡内基梅隆大学国际联合研究院 佛山 528300

1. School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006 2. SYSU-CMU Shunde International Joint Research Institute, Foshan 528300

出动态唯一可解码的传感模型; 在第 2 节, 讨论动态唯一可解码指导构建光纤传感网络所需消耗的光纤传感器的长度问题, 并基于蚁群算法提出动态唯一可解码的优化设计方案; 在第 3 节, 将介绍系统原型的构建并给出实验结果; 在第 4 节, 对结果进行讨论并给出结论.

1 动态唯一可解码指导布置的光纤传感网络

本节首先讨论光纤传感网络的构建, 然后对比已有的唯一可解码, 提出了利用动态唯一可解码对感知空间进行编码, 从而指导布置光纤传感器的方法, 并给出动态唯一可解码的传感模型.

1.1 光纤传感网络

如图 1 所示, 在给定的感知空间中, 将其划分为 $N = N_1 \times N_1$ 个网格, 称第 i 行第 j 列的网格为第 $(i-1) \times N_1 + j$ 个网格, 对感知空间的各个网格区域进行编码, 使得每个网格区域对应一个非零码字, 从而由编码指导光纤传感器的部署, 构建出光纤传感网络.

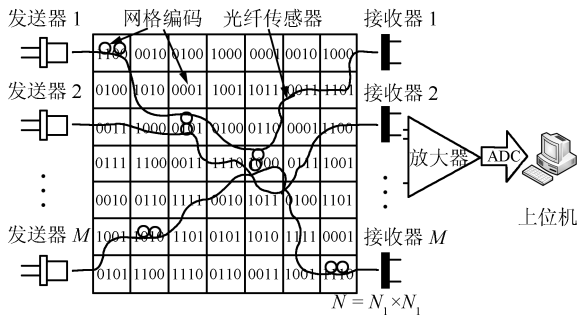


图 1 实现目标定位的光纤传感网络

Fig. 1 The fiber sensor network for target localization

由于光纤传感器具有灵活弯曲的特点使得每条光纤传感器可以同时布置在感知空间的多个网格区域以便监控多个位置信息. 当运动目标出现在任意网格区域时, 目标会踩到布置在该网格区域的光纤传感器, 此时该光纤传感器输出为“1”, 否则为“0”. 若 M 条光纤传感器布置在 N 个网格区域的感知空间中, 则可以用一个 $M \times N$ 维的二值矩阵 A 来描述各条光纤传感器监控的位置信息. $A_{mn} = 1$ 表示第 m 条光纤传感器监控着第 n 个网格区域; $A_{mn} = 0$ 表示第 m 条光纤传感器没有监控第 n 个网格区域. 换言之, 矩阵 A 的第 m 行元素表示第 m 条光纤传感器是否监控着对应的网格区域; 第 n 列元素表示第 n 个网格区域是否受对应的光纤传感器监控着, 称它为第 n 个网格区域的编码, 记为 $\mathbf{a}_n$, M 即为编码的码长. 因此, 各网格区域的编码组成的矩阵:

$$A = [\mathbf{a}_1 \ \mathbf{a}_2 \ \cdots \ \mathbf{a}_N] \quad (1)$$

矩阵 A 决定了各条光纤传感器的部署, 确定了整个光纤传感网络.

1.2 动态唯一可解码传感模型

当运动目标出现在第 n 个网格时, 目标会踩到布置在该网格的光纤传感器, 触发该网格的编码, 此时 M 条光纤传感器都会产生相应的输出信号, 监控着该网格的光纤传感器输出为“1”; 否则, 输出为“0”. 换言之, M 条光纤传感器的输出为第 n 个网格区域的编码, 即为 $\mathbf{a}_n$.

不失一般性, 在 t 时刻, 目标的位置信息表示为 $\mathbf{x}_t = [x_{t,1}, x_{t,2}, \cdots, x_{t,N}]^T$, 其中若目标出现在第 n 个网格, 则 $x_{t,n} = 1$; 否则, $x_{t,n} = 0$ ($n = 1, \cdots, N$); M 条光纤传感器的输出表示为 $\mathbf{y}_t = [y_t^1, y_t^2, \cdots, y_t^M]^T$, 其中 y_t^M 表示第 M 条光纤传感器在 t 时刻的二值输出. 因此, 有传感模型:

$$\mathbf{y}_t = A\mathbf{x}_t \quad (2)$$

我们需要合理地设计矩阵 A 以便能够由输出信号 $\mathbf{y}_t$ 唯一地重构出目标位置 $\mathbf{x}_t$.

文献 [15–16] 利用互不相同的码字对感知空间的各网格区域进行编码, 构造出矩阵 A , 使得 $\mathbf{y}_t$ 与 $\mathbf{x}_t$ 具有一一对应关系, 从而能够由输出信号 $\mathbf{y}_t$ 唯一地重构出目标位置 $\mathbf{x}_t$. 我们称这样的网格编码为唯一可解码, 因此要求矩阵 A 的每一列码字是唯一可解码, 即互不相同, 显然重迭码是唯一可解码可用于构造矩阵 A [15]. 需要指出的是, 运动目标在相邻时刻的位置信息是具有相关性的, 即 $\mathbf{x}_t$ 和 $\mathbf{x}_{t-1}$ 存在时间和空间的相关性, 而利用唯一可解码对感知空间进行编码, 只是孤立地对单一时刻的位置进行编码. 这将导致各网格的编码存在大量的冗余信息, 编码长度变长, 因此需复用较多条光纤传感器对感知空间进行编码.

本文考虑了时间和空间的相关性, 提出了利用动态唯一可解码对感知空间进行编码的方法. 具体而言, 由于 $t-1$ 到 t 时刻的时间间隔很小, 运动目标在相邻时刻的位置不会发生突变, 即相邻时刻的位置信息存在相关性. 如图 2 所示, 本文假设目标在下一时刻的运动位置是上一时刻位置的四邻域范围. 考虑相邻两个时刻的输出信号与位置信息, 传感模型可表示为

$$[\mathbf{y}_t \ \mathbf{y}_{t-1}] = A[\mathbf{x}_t \ \mathbf{x}_{t-1}] \quad (3)$$

由于目标位置 $\mathbf{x}_t$ 和 $\mathbf{x}_{t-1}$ 在时间和空间上具有相关性, 为此对两个具有时空相关性的网格区域进行联合编码, 使得感知空间的所有联合编码互不相同, 即每个网格的编码与它的四邻域网格的编码相联合唯一, 从而保证 $[\mathbf{y}_t \ \mathbf{y}_{t-1}]$ 与 $[\mathbf{x}_t \ \mathbf{x}_{t-1}]$ 具有

一一对应关系. 我们称这样的网格编码为动态唯一可解码, 因此要求矩阵 A 的任一列码字都是动态唯一可解码. 动态唯一可解码的数学模型可描述为有向图 $G = (A(G), E(G), \psi_G)$, 其中顶点集合 $A(G) = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ 表示各网格的编码, 弧集 $E(G) = \{e_{1,2}, e_{1,1+N_1}, \dots, e_{N,N-N_1}, e_{N,N-1}\}$ 表示各网格与它的四邻域网格的联合, 即两个具有相关性网格的联合, ψ_G 是从集合 $E(G)$ 到 $A(G) \times A(G)$ 的一个映射, 表示两个具有相关性网格的联合与联合编码的对应关系, 记 $\psi_G(e_{1,2}) = a_1 a_2, \forall e_1, e_2 \in E(G)$, 且 $e_1 \neq e_2$, 若 $\psi_G(e_1) \neq \psi_G(e_2)$, 则称 $A(G)$ 的元素为动态唯一可解码.

利用动态唯一可解码对感知空间进行编码, 保证了 $[y_t \ y_{t-1}]$ 与 $[x_t \ x_{t-1}]$ 具有一一对应关系, 因此只需建立它们之间对应的关系表, 通过查表的方式即可实现目标位置的重构. 需要指出的是, 重构过程需要知道相邻两个时刻的输出信号, 因此初始时刻的位置信息需要等待下一时刻的输出信号才能实现重构, 但后续的位置信息都可以由当前时刻的输出信号实时重构出来.

显然唯一可解码也是动态唯一可解码, 反之不成立. 利用动态唯一可解码对感知空间进行编码, 构造出矩阵 A , 充分利用了相邻时刻位置信息的相关性进行编码, 有效限制了编码的冗余信息, 因此无需要求矩阵 A 的每列码字互不相同, 放宽了对编码的要求. 如表 1 所示, 对比唯一可解码, 同样的网格区域数目利用动态唯一可解码进行编码, 可以减少编码的长度. 因此, 对比唯一可解码, 利用动态唯一可解码指导光纤传感器的部署能有效地减少所需的传感器数目, 进而提高感知效率.

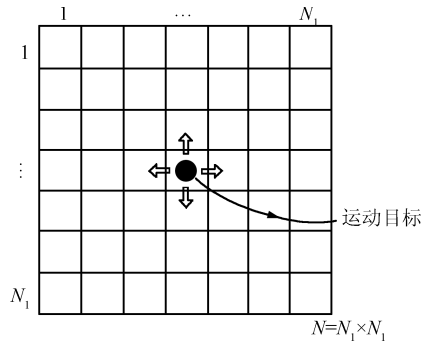


图 2 相邻时刻目标位置说明

Fig. 2 Target position of adjacent time

表 1 所需光纤传感器数目

Table 1 The number of required fiber sensors

N	9	16	25	36	49	64	81
M_{UD}^1	4	5	5	6	6	7	7
M_{DUD}^2	3	3	4	4	4	5	5

2 动态唯一可解码的优化设计

本节首先讨论动态唯一可解码指导布置光纤传感器消耗的长度问题, 然后基于蚁群算法提出动态唯一可解码的优化设计方案.

2.1 设计目标

利用动态唯一可解码组成的矩阵 A 指导布置光纤传感器时, 若 $A_{mn} = 1$, 我们将第 m 条光纤传感器编织后布置在第 n 个网格区域, 编织消耗的长度为 θ , 称需要编织的网格为节点. 需要指出的是, 若一条光纤传感器需要在多个节点进行编织, 则前后节点的连接将会消耗一定量的光纤传感器. 换言之, 若矩阵 A 中第 m 行元素有 z_m 个“1”, 则第 m 条光纤传感器的部署方式为连接 z_m 个节点并且在节点处进行编织, 因此第 m 条光纤传感器所需消耗的长度为 $L_m = z_m \theta + \text{opt} L_m$, 其中 $\text{opt} L_m$ 表示第 m 条光纤传感器采用最短路径连接所有节点所需消耗的长度. 因此, 矩阵 A 指导布置光纤传感器所需消耗的总长度为

$$L = \sum_{m=1}^M L_m = z\theta + \text{opt} L \quad (4)$$

其中, $z = \sum_{m=1}^M z_m$, $\text{opt} L = \sum_{m=1}^M \text{opt} L_m$.

由于 M 条光纤传感器的输出信号能组成 $2^M - 1$ 个不同的非零码字, 因此我们需要在 $(2^M - 1)^N$ 个码字组合中搜索出 N 个动态唯一可解码对感知空间进行编码. 然而, 不同的动态唯一可解码组成的矩阵 A 指导布置光纤传感器所需消耗的长度 L 不同. 为此, 我们的设计目标是搜索出 N 个动态唯一可解码, 构造出矩阵 A , 使得布置在感知空间的光纤传感器长度最短, 目标函数可表示为

$$\min L = \min \sum_{m=1}^M L_m \quad (5)$$

这是一个带约束条件的组合优化问题, 通过穷举法根本无法求解. 随着人们对现代生物特征的不断研究, 一些进化的仿生算法可以比较理想地解决复杂的组合优化问题. 蚁群算法是继模拟退火算法、遗传算法、禁忌搜索算法之后的又一种应用于组合优化问题的启发式算法^[17-19], 通过模拟蚁群搜索食物的行为, 采用正反馈结构、分布式计算与某种启发算子相结合的方法, 能够很快地发现较好解^[20-23]. 因此, 本文基于蚁群算法提出动态唯一可解码的优化设计方案.

¹UD 表示唯一可解码 (Uniquely decipherable code).
²DUD 表示动态唯一可解码 (Dynamic uniquely decipherable code).

2.2 算法设计

我们通过设计虚拟的“蚂蚁”，让它们摸索不同的码字连接路线，并留下随时间逐渐消失的虚拟“信息素”，根据“信息素较浓的路线更近原则”，即可搜索到最佳的码字连接路线，构造最优矩阵 A 。

假设 C 为 $2^M - 1$ 个非零码字集合， m 为蚂蚁总数目， $\tau_{ij}(t)$ 是 t 时刻路径 (i, j) (即蚂蚁从码字 i 转移到码字 j) 残留的信息素强度，其中 $i, j \in \{1, \dots, 2^M - 1\}$ 。当蚂蚁在搜索下一个动态唯一可解码时，若访问了 $2^M - 1$ 个不同的码字都不是动态唯一可解码，此时，禁忌表将满 (设 $tabu_i^k$ 表示第 k 只蚂蚁在码字 i 的禁忌表， $tabu_i^k(s)$ 表示禁忌表中的第 s 个元素)，则称该蚂蚁为死蚂蚁；反之称为活蚂蚁。初始时刻所有蚂蚁都是活蚂蚁，每只蚂蚁具有以下特点：

- 1) 依据状态转移概率选择下一个访问的码字。
- 2) 规定蚂蚁走合法路线，即蚂蚁每次转移的码字都是动态唯一可解码，直到变成死蚂蚁或者周游完 N 个码字，蚂蚁才停止访问。
- 3) 周游完 N 个码字的活蚂蚁在它转移过的码字之间留下信息素。

在 0 时刻进行初始化过程，蚂蚁放置在不同的码字，码字间的每一条路径都有一个相同的初始信息素强度值 $\tau_{ij}(0)$ 。每只蚂蚁依据状态转移概率 (见式 (9)) 选择下一个要访问的码字，禁忌表记录下当前访问的码字，直到变成死蚂蚁或者转移到下一个动态唯一可解码，此时，禁止表置空，然后活蚂蚁继续搜索下一个动态唯一可解码。最终活蚂蚁会周游完 N 个码字，搜索出一条码字连接路线，组成 N 个动态唯一可解码。此时，计算每只活蚂蚁 k 搜索出的 N 个动态唯一可解码用于指导布置光纤传感器所需消耗的光纤传感器长度 L_k ，并保存最小 L_k 对应的 N 个动态唯一可解码。然后依据式 (6)~(8) 更新信息素。经过多次迭代，即可搜索出一条最佳的码字连接路线，组成 N 个动态唯一可解码，构造出最优矩阵 A 。如果算法在 N_{cmax} 次迭代后结束，算法的时间复杂度为 $O(N_{cmax} \cdot N^2 \cdot m)$ ，空间复杂度为 $O(N^2) + O(N \cdot m)$ 。

信息素更新公式为

$$\tau_{ij}(t + \Delta t) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (6)$$

其中 $\rho \in [0, 1)$ 为信息素挥发系数， $(1 - \rho)$ 表示信息素残留因子，

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (7)$$

$\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 表示第 k 只蚂蚁在本次迭代中留在路径

(i, j) 上的信息素数量；

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在本次迭代中周游完 } N \text{ 个码字且经过路径 } (i, j) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中， Q 是一个常数， L_k 表示布置活蚂蚁 k 搜索出的 N 个动态唯一可解码所需消耗的光纤传感器长度。

第 k 只蚂蚁在 t 时刻从码字 i 转移到码字 j 的状态转移概率为

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}]^\beta}, & j \in \text{allowed}_k \\ 0, & j \notin \text{allowed}_k \end{cases} \quad (9)$$

其中， $\text{allowed}_k = \{C - \text{tabu}_i^k\}$ ， α 和 β 是控制信息素和启发函数相对重要性的参数，这里启发函数定义为码字间的距离，即码距。因此状态转移概率是码字间距离和 t 时刻残留在路径上的信息素强度的权衡。

2.3 算法实现步骤

步骤 1. 初始化参数： $\tau_{ij}(0) = \text{const}$ (常数)， $\Delta\tau_{ij}(0) = 0$ ， $N_c = 0$ ， N ， α ， β ， ρ ， N_{cmax} ， $tabu_i^k$ ， m ，并将 m 只蚂蚁随机置于 $2^M - 1$ 个码字上；

步骤 2. 迭代次数 $N_c \leftarrow N_c + 1$ ；

步骤 3. 蚂蚁数目 $k \leftarrow k + 1$ ；

步骤 4. 蚂蚁 k 依据式 (9) 计算的转移概率选择码字 j 进行访问 $j \in \text{allowed}_k = \{C - \text{tabu}_i^k\}$ ；

步骤 5. 当蚂蚁 k 搜索到下一个动态唯一可解码时，禁忌表 $tabu_i^k$ 置空；

步骤 6. 当蚂蚁 k 搜索到 N 个动态唯一可解码或者变成死蚂蚁时，停止继续访问；否则，转至步骤 4；

步骤 7. 如果 $k < m$ 转至步骤 3；

步骤 8. 计算每只活蚂蚁 k 搜索出的 N 个动态唯一可解码对应的 L_k ；

步骤 9. 依据式 (6)~(8) 更新路径信息素；

步骤 10. 如果 $N_c < N_{cmax}$ 且未进入停滞状态，转至步骤 2；停滞状态指所有蚂蚁都走同一路线；

步骤 11. 输出最佳的 N 个动态唯一可解码的连接路线，组成最优矩阵 A 。

3 实验研究

本节首先讨论所提出的动态唯一可解码的优化设计方案的实现结果，然后介绍利用动态唯一可解

码对感知空间进行编码实现目标跟踪的系统原型的构建, 并给出实验结果.

3.1 算法实现结果

假设感知空间被划分为 $N = N_1 \times N_1 = 7 \times 7$, 各网格区域的边长为 $l = 1\text{ m}$, 编织消耗的光纤传感器长度为 $\theta = 2\text{ m}$, 利用本文提出的优化设计方案生成矩阵 A , 其中参数设置为 $\alpha = 1, \beta = 5, \rho = 0.3, N_{\text{cmax}} = 50, m = 50$, 重复 20 次实验, 实验结果如表 2 所示, 其中最小所需的光纤传感器长度为 $L_{\text{min}} = 348\text{ m}$, 且其出现 17 次, 由此可见该算法具有较强的鲁棒性. 如图 3 所示, 20 次实验中生成 3 个不同的最优矩阵 A , 其所需的光纤传感器长度都达到最小. 矩阵 A 的非零元素个数将直接影响系统设计的复杂度, 因此非零元素的个数可作为选择最优矩阵 A 指导布置光纤传感器的依据.

表 2 实验结果
Table 2 The experimental results

长度 (m)	348	349	350	其他
次数	17	2	1	0

如图 4 所示, 随机搜索 50 个不考虑优化的一般动态唯一可解码组成的矩阵 A , 其中最小、平均和最大所需的光纤传感器长度分别为 $L_{\text{min}50} = 352\text{ m}$, $L_{\text{mean}50} = 363\text{ m}$ 和 $L_{\text{max}50} = 378\text{ m}$. 因此, 对比不考虑优化的一般动态唯一可解码组成的矩阵 A , 采用最优矩阵 A 指导布置光纤传感器, 能有效地减少所需的光纤传感器长度, 使得布置在感知空间的光纤传感器长度最短.

3.2 系统构建及实验验证

利用图 3(a) 所示的 49 个动态唯一可解码组成的矩阵 A 指导 4 条光纤传感器在 7×7 的感知区域中进行部署, 每条光纤传感器按照最短路径连接完所有节点, 并在节点处编织布置光纤传感器, 最终构建出如图 5 所示的光纤传感网络系统原型, 系统包括 4 个发送器 (HFBR1416, Avago) 和 4 个接收器 (HFBR1414, Avago).

实验中, 设定采样时间间隔为 0.1 s , 目标在下一时刻的运动位置是当前位置的四邻域范围, 目标按照约定路线行走, 约定路线为网格 $43 \rightarrow 44 \rightarrow 45 \rightarrow 38 \rightarrow 39 \rightarrow 40 \rightarrow 33 \rightarrow 32 \rightarrow 25 \rightarrow 24 \rightarrow 17 \rightarrow 16 \rightarrow 9 \rightarrow 8 \rightarrow 1$. 当运动目标在网格区域踩到光纤传感器时, 光纤传感器接收端会接收到变化的光强信号, 通过阈值处理即可量化出光纤传感器的二值输出信号. 实验中输出的光强信号如图 6 所示, 量化后的二值输出信号如图 7 所示, 其中阈值设定为 85% 的稳态电压值, 通过查找编码与位置的对

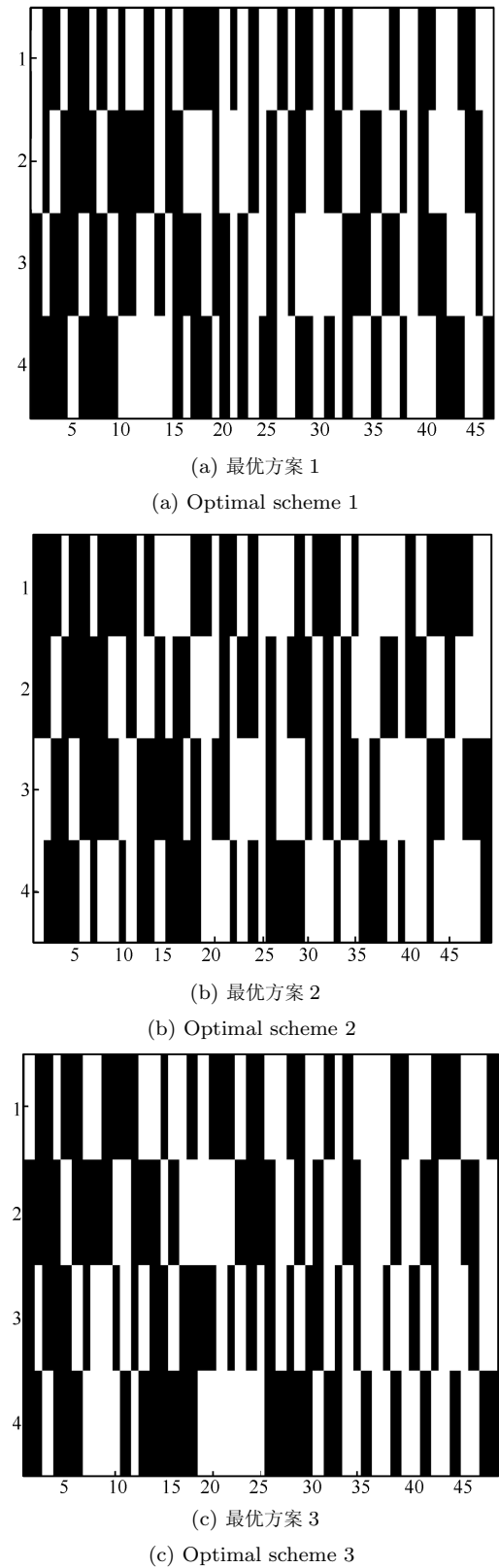


图 3 测量矩阵 A 的最优方案 (白色表示 “1”, 黑色表示 “0”)

Fig. 3 Optimal schemes of measurement matrix A (White-colored tiles correspond to 1 and dark tiles to 0.)

应关系表即可重构出运动目标的行走路线, 如图 8 所示, 重构出的运动路线与约定的实际路线一致. 因此, 实验结果验证了提出的利用动态唯一可解码对感知空间进行编码实现目标跟踪的方法的可行性和正确性.

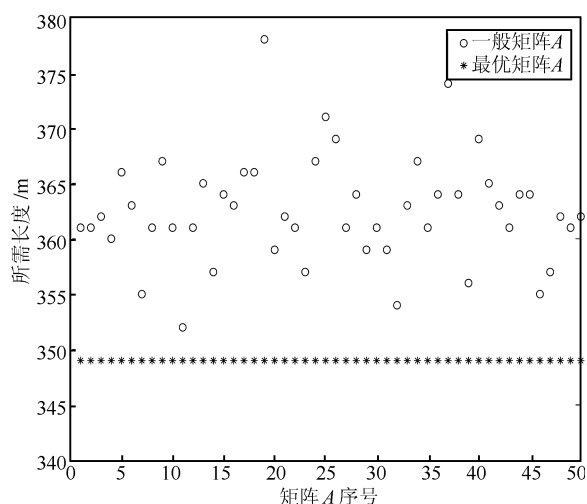


图 4 矩阵 A 与所需光纤传感器长度的关系

Fig. 4 The relationship between the matrix A and the length of fiber sensors required

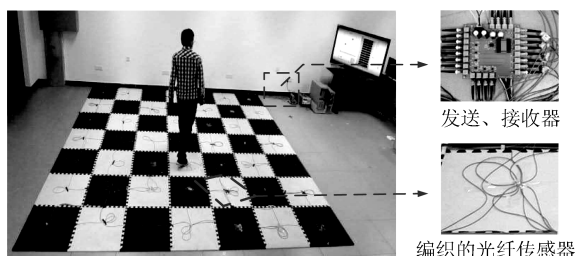


图 5 光纤传感网络系统原型

Fig. 5 The system prototype of a fiber sensor network

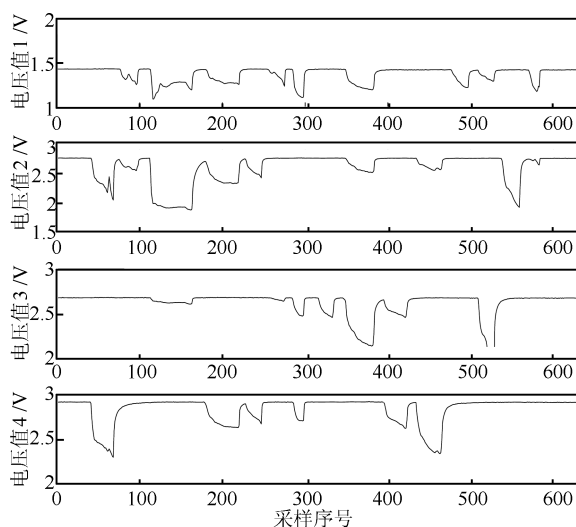


图 6 模拟电压输出

Fig. 6 Analog voltage output

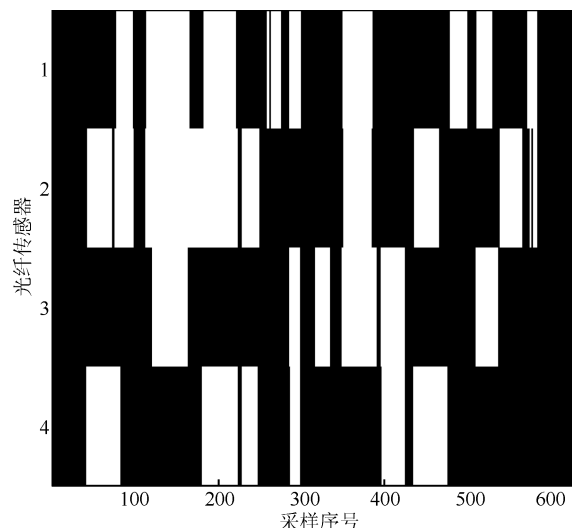


图 7 二值量化输出

Fig. 7 Binary quantization output

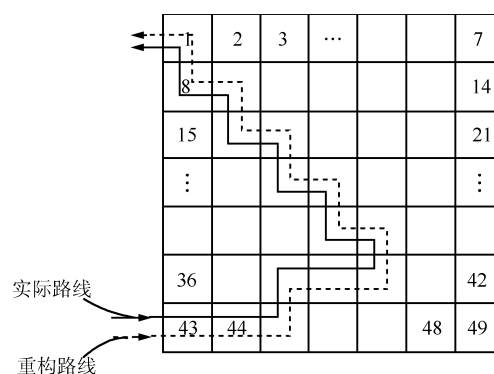


图 8 实际运动路线与重构运动路线

Fig. 8 The actual and reconstructed movement paths

4 讨论与结论

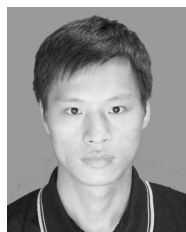
在 49 个网格的感知空间中, 利用唯一可解码实现单目标的跟踪需要 6 条光纤传感器^[15-16], 而利用动态唯一可解码实现跟踪只需要 4 条光纤传感器. 由此可见, 利用动态唯一可解码指导光纤传感器的部署能有效地减少所需的传感器数目. 此外, 对比一般的动态唯一可解码, 利用本文提出的优化设计方案生成的动态唯一可解码指导布置光纤传感器, 能最小化所需的光纤传感器长度.

本文构建了光纤传感网络实现单目标的跟踪, 提出了利用动态唯一可解码对感知空间进行编码, 实现目标跟踪的方法, 减少了所需的光纤传感器数目. 与此同时, 基于蚁群算法提出了动态唯一可解码的优化设计方案, 有效地减少了所需的光纤传感器长度, 使得布置在感知空间的光纤传感器长度最短.

References

- 1 Jiang Ming-Xin, Wang Hong-Yu, Liu Xiao-Kai. A multi-target tracking algorithm based on multiple cameras. *Acta*

- Automatica Sinica*, 2012, **38**(4): 531–539
(姜明新, 王洪玉, 刘晓凯. 基于多相机的多目标跟踪算法. 自动化学报, 2012, **38**(4): 531–539)
- 2 Shen Le-Jun, You Zhi-Sheng, Li Xiao-Feng. Real-time visual tracking of multiple targets using bootstrap importance sampling. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(10): 1663–1670
(沈乐君, 游志胜, 李晓峰. 自助重要性采样用于实时多目标视觉跟踪. 自动化学报, 2012, **38**(10): 1663–1670)
 - 3 Liu Shao-Hua, Zhang Mao-Jun, Xiong Zhi-Hui, Chen Wang. A robust and efficient video moving object detection and tracking algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(8): 1055–1062
(刘少华, 张茂军, 熊志辉, 陈旺. 一种鲁棒高效的视频运动目标检测与跟踪算法. 自动化学报, 2009, **35**(8): 1055–1062)
 - 4 Zabulis X, Grammenos D, Sarmis T, Tzevanidis K, Paderleris P, Koutlemanis P, Argyros A A. Multicamera human detection and tracking supporting natural interaction with large-scale displays. *Machine Vision and Applications*, 2013, **24**(2): 319–336
 - 5 Misra S, Singh S. Localized policy-based target tracking using wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2012, **8**(3), Article No. 27, DOI: 10.1145/2240092.2240101
 - 6 Feng G D, Guo X M, Wang G L. Infrared motion sensing system for human-following robots. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, **185**: 1–7
 - 7 Hao Q, Brady D J, Guenther B D, Burchett J B, Shankar M, Feller S. Human tracking with wireless distributed pyroelectric sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2006, **6**(6): 1683–1696
 - 8 Jaimes A, Sebe N. Multimodal human computer interaction: a survey. *Computer Vision and Image Understanding*, 2007, **108**(1–2): 116–134
 - 9 Sekmen A, Wilkes M, Kawamura K. An application of passive human-robot interaction: human tracking based on attention distraction. *IEEE Transaction on Systems*, 2002, **32**(2): 248–259
 - 10 Lee S, Ha K N, Lee K C. A pyroelectric infrared sensor-based indoor location-aware system for the smart home. *IEEE Transactions on Consumer Electronic*, 2006, **52**(4): 1311–1317
 - 11 Kersey A D. A review of recent developments in fiber optic sensor technology. *Optical Fiber Technology*, 1996, **2**(3): 291–317
 - 12 Grattan K T V, Sun T. Fiber optic sensor technology: an overview. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, **82**(1–3): 40–61
 - 13 Ecke W, Latka I, Willsch R, Reutlinger A, Graue R. Fibre optic sensor network for spacecraft health monitoring. *Measurement Science and Technology*, 2001, **12**(7): 229–240
 - 14 Ohno H, Naruse H, Kihara M, Shimada A. Industrial applications of the BOTDR optical fiber strain sensor. *Optical fiber Technology*, 2001, **7**(1): 101–140
 - 15 Zheng Y H, Brady D J, Sullivan M E, Guenther B D. Fiber-optic localization by geometric space coding with a two-dimensional gray code. *Applied Optics*, 2005, **44**(20): 4306–4314
 - 16 Zheng Y H, Pitsianis N P, Brady D J. Nonadaptive group testing based fiber sensor deployment for multiperson tracking. *IEEE Sensors Journal*, 2006, **6**(2): 490–494
 - 17 Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997, **1**(1): 53–66
 - 18 Di Caro G, Dorigo M. AntNet: distributed stigmergetic control for communications networks. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1998, (9): 317–355
 - 19 Liu X J, Yi H, Ni Z H. Application of ant colony optimization algorithm in process planning optimization. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2013, **24**(1): 1–13
 - 20 Tian Zhi-Bo, Tang Li-Xin, Ren Yi-Ming, Zhao Yong-Ming, Wu Cheng-Xin. Solving open-order slab matching problem by ACO with compound neighborhood. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(2): 186–192
(田志波, 唐立新, 任一鸣, 赵永明, 邬成新. 基于合成邻域的蚁群算法求解无委托板坯匹配问题. 自动化学报, 2009, **35**(2): 186–192)
 - 21 Stutzle T, Dorigo M. A short convergence proof for a class of ant colony optimization algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, **6**(4): 358–365
 - 22 Reed M, Yiannakou A, Evering R. An ant colony algorithm for the multi-compartment vehicle routing problem. *Applied Soft Computing*, 2013, **15**(2014): 169–176
 - 23 Chandra M B, Baskaran R. A survey: ant colony optimization based recent research and implementation on several engineering domain. *Expert Systems with Applications*, 2012, **39**(4): 4618–4627



陈喜锋 中山大学信息科学与技术学院
硕士研究生. 主要研究方向为信息获取
与信息处理.

E-mail: xifeng301@126.com

(**CHEN Xi-Feng** Master student
at the School of Information Science
and Technology, Sun Yat-Sen Univer-
sity. His research interest covers infor-
mation acquisition and processing.)



王国利 中山大学信息科学与技术学院
教授. 主要研究方向为压缩传感支配的
信息获取与信息处理.

E-mail: isswgl@mail.sysu.edu.cn

(**WANG Guo-Li** Professor at the
School of Information Science and
Technology, Sun Yat-Sen University.
His research interest covers information
acquisition and processing under the compressed sensing
framework.)



郭雪梅 中山大学信息科学与技术学院
副教授. 主要研究方向为嵌入式系统与
移动计算, 信息获取与信息处理. 本文通
信作者.

E-mail: guoxuem@mail.sysu.edu.cn

(**GUO Xue-Mei** Associate profes-
sor at the School of Information Science
and Technology, Sun Yat-Sen Univer-
sity. Her research interest covers embedded system, mobile
computing, information acquisition and processing. Corre-
sponding author of this paper.)