arXiv:2304.03951v1 [cs.MA] 8 Apr 2023

异质羊群驱赶：概述与展望 ⋆

Anna Fujioka* Masaki Ogura** Naoki Wakamiya***

生物信息工程系，信息科学与技术研究生院，大阪大学，日本大阪 电子
邮箱： *a-fujioka@ist.osaka-u.ac.jp， **m-ogura@ist.osaka-u.ac.jp，

***wakamiya@ist.大阪-u.ac.jp

摘要：利用少数智能体施加的排斥力来引导由多个自主智能体组成的羊群，这一问题称为牧群问题。由于其在工程应用中的潜在价值，该问题正受到越来越多的关注。尽管已有一些研究提出了在这一背景下实现驱赶任务的方法，但大多数研究都假设羊智能体具有相同的动力学特性，而这一假设在现实中仅有时成立。本讨论论文旨在概述近期针对这一问题的研究趋势，即如何弥合通常采用的均一性假设与现实之间的差距。具体而言，我们首先介绍异质羊群的最新引导方法，然后阐述异质羊群牧群问题的展望。

关键词：多智能体系统；牧群问题；导航

1. 引言

受鱼群、鸟群及其他动物启发的群集系统，因其在控制工程多个领域的潜在应用而备受关注（Hemelrijk 和 Hildenbrandt，2008；Ballerini 等，2008；Mikami 等，2020）。在这些导航方式中，受牧羊人引导羊群行为启发的导航方式称为驱赶（Long 等，2020）。在驱赶过程中，少数牧羊智能体利用其对羊智能体施加的排斥力，引导一群羊智能体。这种引导具有诸多潜在应用，包括人群控制（Lien 等，2009）和溢油清理（Masehian 等，2015）。这种引导的数学模型称为驱赶模型，而引导一群羊智能体的问题称为牧群问题。该问题的目标是设计牧羊人智能体的运动规律，以引导羊智能体。

尽管已有若干种运动律（Tsunoda 等，2019；Deng 等，2022），但这些研究大多假设所有羊智能体具有相同的动力学。然而，在一些实际场景中，这一假设未必成立（Hemelrijk 和 Hildenbrandt，2008；Ballerini 等，2008；Jolles 等，2020）。在此背景下，文献中出现了一种新的研究趋势：在设计牧羊算法时，明确考虑羊智能体的异质性。

最近，Himo 等人（2022）提出了一种针对包含不受牧羊人排斥力作用的智能体的羊群的引导方法。在该方法中，牧羊人引导有响应的羊绕过无响应的羊，然后利用羊的集群行为引导所有羊前往目标区域。此外，我们最近扩展了这一方法，并提出了针对包含变异羊的羊群的引导方法。在该方法中，牧羊人根据估计的动力学判断羊的类型。随后，牧羊人将判定为正常的羊引导至目标区域。本文旨在介绍作者此前的这些研究工作，并进一步展望异质羊群驱赶问题的未来发展。

⋆ 本研究获得了日本学术振兴会科研费资助（项目编号：JP21H01352、JP21H01353、JP22H00514），以及 JST登月研发计划资助（项目编号：JPMJMS2284）。

2. 先前研究

本节介绍关于驱赶异质羊群的先前研究。首先，在第 2.1 小节中，我们介绍羊智能体动力学的数学模型。随后，在第 2.2 小节中，我们介绍一种用于驱赶同质羊群的引导方法，因为该方法构成了异质羊群驱赶方法的基础。接着，我们将在第 2.3 和第 2.4 小节中介绍两种已有的异质羊群驱赶方法。

2.1 驱赶模型

首先，我们介绍文献中常用的羊智能体模型。该模型基于 Reynolds 于 1987 年提出的 Boid 模型。在该模型中，第 i 个羊智能体在时间 k 的位置 $x_i(k)$ 由以下差分方程更新

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k), \tag{1}$$

其中，$v_i(k)$ 表示时间 k 时第 i 只羊的运动向量。在 Boid模型中，假设羊智能体受到以下三种力：“分离力”用于防止羊彼此碰撞，“对齐力”用于使其速度与

其他智能体的速度一致，“吸引力”用于使其靠近其他智能体。除这些力外，还假设羊会避开牧羊人智能体。因此，时间 k 时第 i 只羊的运动向量为

$$v_i(k) = K_{i1}v_{i1}(k) + K_{i2}v_{i2}(k) + K_{i3}v_{i3}(k) + K_{i4}v_{i4}(k), \quad (2)$$

其中，K_{i1}、K_{i2}、K_{i3} 和 K_{i4} 是取决于各个羊智能体的非负常数，而向量 v_{i1}、v_{i2}、v_{i3} 和 v_{i4} 分别对应上述四种力。

我们假设第 i 只羊受到以 x_i（k）为圆心、$R > 0$ 为半径的圆内所有羊施加的力。如果该范围内没有其他羊，则设 v_{i1}（k）$= v_{i2}$（k）$= v_{i3}$（k）$= 0$。若令 S_i（k）表示时刻 k 距离第 i 只羊不超过 R 的羊的索引集合，则向量 v_{i1}（k）、v_{i2}（k）、v_{i3}（k）和 v_{i4}（k）可表示为

$$v_{i1}(k) = -\frac{1}{|S_i(k)|}\sum_{j\in S_i(k)}\frac{x_j(k)-x_i(k)}{\|x_j(k)-x_i(k)\|^3}, \quad (3)$$

$$v_{i2}(k) = \frac{1}{|S_i(k)|}\sum_{j\in S_i(k)}\frac{v_j(k-1)}{\|v_j(k-1)\|}, \quad (4)$$

$$v_{i3}(k) = \frac{1}{|S_i(k)|}\sum_{j\in S_i(k)}\frac{x_j(k)-x_i(k)}{\|x_j(k)-x_i(k)\|} \quad (5)$$

$$v_{i4}(k) = -\frac{x_d(k)-x_i(k)}{\|x_d(k)-x_i(k)\|^3}. \quad (6)$$

2.2 最远智能体目标选择方法

用于驱赶异质羊群的两种方法基于一种针对同质羊群的牧羊算法，即最远智能体目标选择（FAT）方法（Tsunoda 等，2019）。在 FAT 方法中，牧羊人引导距离目标区域最远的羊。众所周知，这一简单策略能够有效地引导羊智能体。

为描述 FAT 方法，我们先引入一些符号。设时刻 k 牧羊人的位置记为 x_d(*k*)。那么，FAT 方法中位置 x_d(*k*) 的更新规则如下：

$$x_d(k+1) = x_d(k) + v_d(k), \quad (7)$$

其中，v_d(*k*) 表示牧羊人在时刻 k 的运动向量。假设牧羊人受到以下三种力：指向距离目标最远的羊的吸引力 v_{d1}、用于避免与距离牧羊人最近的羊发生碰撞的分离力 v_{d2}，以及指向目标区域的排斥力 v_{d3}。借助这三种力，牧羊人能够移动到羊群后方，并将羊群引向目标。具体而言，运动向量 v_d(*k*) 定义如下：

$$v_d(k) = K_{d1}v_{d1}(k) + K_{d2}v_{d2}(k) + K_{d3}v_{d3}(k), \quad (8)$$

其中，K_{d1}、K_{d2}和 K_{d3} 为非负常数，向量 v_{d1}(*k*)、v_{d2}(*k*)和 v_{d3}(*k*)定义如下：

$$v_1(k) = \frac{x_{t(k)}(k) - x_{\mathrm{d}}(k)}{||x_{t(k)}(k) - x_{\mathrm{d}}(k)||}, \quad (9)$$

$$v_2(k) = -\frac{x_{n(k)}(k) - x_{\mathrm{d}}(k)}{||x_{n(k)}(k) - x_{\mathrm{d}}(k)||^3}, \quad (10)$$

$$v_3(k) = -\frac{x_{\mathrm{g}}(k) - x_{\mathrm{d}}}{||x_{\mathrm{g}}(k) - x_{\mathrm{d}}||}, \quad (11)$$

其中，t(*k*)表示距离目标最远的羊的索引，n(*k*)表示距离牧羊人最近的羊的索引。

2.3 驱赶含有无响应羊的羊群的牧羊算法

我们介绍的第一种异质羊群引导方法由 Himo 等人（2022）提出。在他们的模型中，羊群包含两类羊智能体：有响应的羊和无响应的羊。假设响应型羊智能体具有正增益 K_{i1}、.....、K_{i4}，而无响应的羊在避让牧羊人智能体时的增益为零，即 $K_{i4} = 0$。

在 Himo 等人（2022）的方法中，假定牧羊人已知所有羊的位置以及每只羊的类型（即有响应或不响应）。根据这些信息，牧羊人需要引导所有羊智能体前往指定的目标区域。该方法中的牧羊人引导行为可分为以下两种：聚集和引导。首先，牧羊人尝试引导有响应的羊围绕不响应的绵羊移动。需要注意的是，假定不响应的绵羊仍会对有响应的羊产生吸引力。因此，引导所有不响应的绵羊移动到有响应的羊附近，可以让牧羊人通过引导有响应的羊间接引导不响应的绵羊。确保所有不响应的绵羊都靠近有响应的羊之后，牧羊人便可引导所有羊前往目标区域。该方法通过第 2.2 小节所述的 FAT 方法，引导有响应的羊靠近不响应的羊。具体而言，牧羊人会引导距离不响应的羊最远的那只有响应的羊，并使其朝牧羊人所要引导其前往的不响应的羊移动。

Himo 等人（2022）表明，该引导方法表现出较高的引导成功率。具体而言，他们将牧羊成功率定义为：在 100 种不同的羊群初始排列仿真中，在规定的时间限制内成功将羊群引导至目的地的仿真次数。他们观察到，在 $N = 10$、$N = 30$ 和 $N = 50$ 等各种情形下，无论不响应的绵羊数量是多少，他们的方法都优于 FAT 方法，其中 N 表示羊的总数。

2.4 含有变异羊的羊群牧羊算法

在本小节中，我们介绍 Fujioka 等人（2022）提出的异质羊群和引导方法。首先介绍他们的模型。在该模型中，他们引入了一种名为变异羊的羊群智能体，它

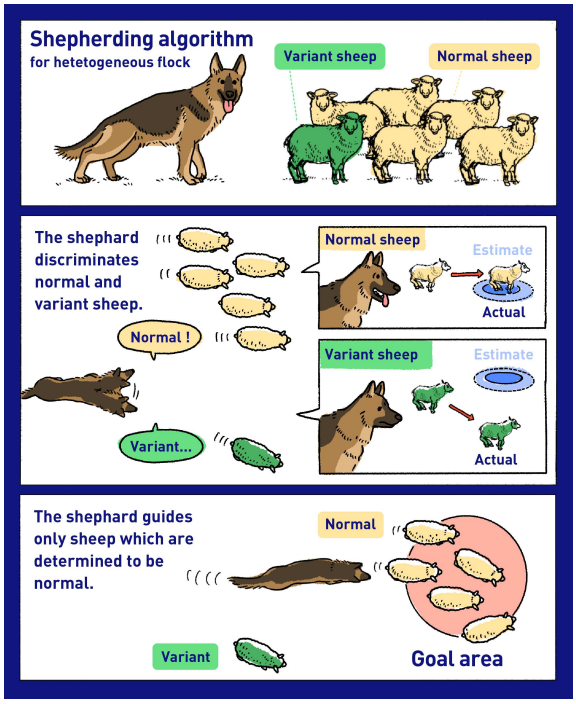


图 1. Fujioka 等人（2022）提出的方法概要。插图作者：Chihiro Kinoshita。

使羊群具有异质性。在他们的模型中，假设变异羊接收的力不超过分离、对齐、吸引和避让中的一种。因此，共有 14 种不同类型的变异羊，分别只接收一种、两种和三种力。他们还假设只能存在一种类型的变异羊。为了对变异羊进行建模，他们将变异羊不接收的力的增益设为零，这与 Himo 等人（2022）在第 2.3 小节中描述的模型类似。

在该方法中，假设牧羊人能够定期获取所有羊的位置。此外，还假设牧羊人已知一组正常羊（即非变异羊）的估计系数。需要指出的是，估计值不一定正确。牧羊人随后根据估计值预测羊的轨迹。定期获取羊的位置时，牧羊人会测量预测轨迹与实际测得位置之间的距离。如果该距离大于阈值，牧羊人就会判定这只羊为变异羊。随后，牧羊人只引导被判定为正常羊的羊。图 1 展示了该方法的概要。

在 Fujioka 等人（2022）的研究中，作者比较了其方法与 FAT 方法的引导性能。他们证实，由于纳入了判别机制，其引导方法总体上优于 FAT 方法。具体而言，随着羊群中变异羊数量的增加，FAT 方法的引导成功率往往会降低；而无论变异羊的类型如何，其方法都表现出相对较高的性能（引导成功率 $> 60\%$）。

3. 展望

本节将介绍异质羊群驱赶研究的展望。

如第 2 节所述，目前已有一些引导方法。Himo 等人（2022）提出了适用于含有不响应绵羊的羊群的牧羊算法。我们的研究团队将变异羊定义为 14 种类型，并在此基础上扩展了这项工作，提出了一种适用于所有类型的方法。开发此类引导异质羊群的方法，将拓展其潜在应用范围。然而，如下所述，这些方法仍存在一些问题。

3.1 绵羊模型的泛化

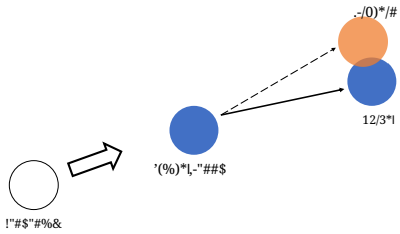
首先，我们来探讨绵羊模型的泛化。对绵羊模型的一种可能扩展，是通过改变增益，进一步增加变异类型的多样性。例如，如果将排斥系数 K_{i4} 设为任意大于 0 的值，就可以改变羊对牧羊人的响应幅度。如果将其设为负数，则可以定义会被牧羊人吸引的变异羊。对变异羊进行这种归纳，有助于我们开发一种能够应对意外移动的羊的鲁棒方法。

另一种方案是增加同时存在的变异类型数量。在我们的方法中，牧羊人根据所有羊的实际位置与预测位置之间的距离来计算阈值，但当多种变异羊同时存在时，这个阈值可能无法恰当设定。因此，我们未来的一项工作是为这种情况开发一种引导方法。

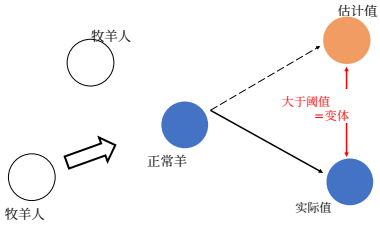
此外，我们还可以考虑对绵羊模型进行更显著的改动。本文提出的绵羊模型基于 Boid模型。不过，我们希望使用 Boid模型以外的模型重新定义异质羊群。例如，Go等人（2021）假设羊受到以下五种力的作用：“前进方向力”，使其朝先前的方向移动；“吸引力”，使其朝群体的质心移动；“排斥力”，使其避开其他羊；另一种“排斥力”，使其避开牧羊人；以及“随机误差力”。绵羊模型的这种变化可能会改变高效羊群引导的方法。另一项未来工作是开发一种能够针对任意绵羊模型正确引导羊群的方法。

3.2 牧羊人模型的扩展

接下来，我们讨论牧羊人模型和运动律。当有多个牧羊人时，我们的确定方法是否有效尚不明确。如果牧羊人之间无法相互通信，那么一名牧羊人预测的轨迹可能会受到其他牧羊人的影响而不准确（见图 2）。如果牧羊人之间可以相互通信（例如，可以获取其他牧羊人的位置），则不太可能出现此类预测轨迹不准确的情况。然而，当采用 FAT 方法时，所有牧羊人很可能会追赶同一只羊。为防止这种情况，有必要为



(a) 一名牧羊人



(b) 两名牧羊人

图 2. 只有一名牧羊人时，牧羊人可以准确估计羊的轨迹。然而，若牧羊人不止一名，则很难考虑其他牧羊人对羊的轨迹造成的影响。

多个牧羊人采用不同的运动律（Lien 等，2005）。我们也希望评估在这些方法中使用我们的确定方法的有效性。

3.3 理论分析

在第 2 节所述的所有方法中，方法的有效性是通过模拟多个初始位置下引导的成功率来衡量的。智能体模型是非线性的，因此很难证明引导能够成功。不过，我们认为，探索证明方法将有助于研究该方法的确切有效性。

下面讨论如何进行证明。证明之所以困难，是因为智能体模型具有非线性。一种思路是简化模型。例如，对于第 2.2 小节所述的 FAT 方法，我们可以假设牧羊人始终与最远的羊保持固定距离，或者将羊的数量设为两只，只考虑最小交互。这样的证明可以让我们分析成功引导所需的异质性程度。例如，当变异羊的系数为 αK_i，正常羊的系数 K_i 取任意实数 α 时，就有可能确定引导成功率较高时 α 的取值范围。进一步研究这些结果，将有助于开发成功率更高的引导方法。

4. 结论

本文回顾了传统研究，并展望了异质羊群及其引导方法的未来发展。异质羊群的定义以及牧羊人运动律的发展仍远未完善。然而，我们相信，对异质羊群开展进一步研究将有助于加深对群体控制的理解。通过进一步研究，我们希望拓展群体控制的适用范围。

参考文献

Ballerini, M., Cabibbo, N., Candelier, R., Cavagna, A., Cisbani, E., Giardina, I., Orlandi, A., Parisi, G., Procaccini, A., Viale, M., 等（2008）。椋鸟群的实证研究：集体动物行为的基准研究。《动物行为》，76(1)，201–215。Deng, Y., Ogura, M., Li, A., 和 Wakamiya, N.（2022）。将单个智能体从群体中分离的牧群控制。载于《第一届 IFAC 复杂系统控制研讨会》。Fujioka, A., Ogura, M., 和 Wakamiya, N.（2022）。基于模型辨别的异质羊群驱赶算法。《先进机器人学》，1–16。Go, C.K., Koganti, N., 和 Ikeda, K.（2021）。解决牧群问题：模仿学习能够习得切换算法。载于《2021 国际神经网络联合会议》，1–7。Hemelrijk, C.K. 和 Hildenbrandt, H.（2008）。鱼群的自组织形态与前部密度。《动物行为学》，114(3)，245–254。Himo, R., Ogura, M., 和 Wakamiya, N.（2022）。驱赶不响应绵羊的迭代算法。《数学生物科学与工程》，19(4)，3509–3525。Jolles, J.W., King, A.J., 和 Killen, S.S.（2020）。个体异质性在集体动物行为中的作用。《生态学与进化趋势》，35(3)，278–291。Lien, J.M., Rodriguez, S., Malric, J.P., 和 Amato, N.M.（2005）。多个牧羊人的牧群行为。载于《2005 IEEE 国际机器人与自动化会议》，3402–3407。Lien J.-M, 和 Pratt E.（2009）。牧羊人运动的交互式规划。载于《AAAI 春季研讨会：从人类教师学习的智能体》，95–102。Long, N.K., Sammut, K., Sgarioto, D., Garratt, M., 和 Abbass, H.A.（2020）。将驱赶作为仿生群体机器人引导方法的全面综述。《IEEE 计算智能新兴主题汇刊》，4(4)，523–537。Masehian E., 和 Royan M.（2015）。用于同时进行物体收集与驱赶的多机器人集群系统协同控制。Cham：Springer International Publishing，97–114。Mikami, T., Kano, T., 和 Ishiguro, A.（2020）。通过共享食物生存的吸血蝙蝠群落形成过程的基于智能体的模型。《人工生命与机器人学》，25(4)，561–568。Reynolds, C.W.（1987）。群、畜群与鱼群：一种分布式行为模型。载于第14届年度计算机图形学与交互技术会议，25–34。Str¨ombom D., Mann R.P., Wilson A.M., Hailes S., Morton A.J., Sumpter D.JT. 和 King A.J.（2014）。解决牧群问题：用于驱赶自主交互智能体的启发式方法。《英国皇家学会界面》，11，20140719。Tsunoda, Y., Ishitani, M., Sueoka, Y., 和 Osuka, K.（2019）。具有动力学的绵羊模型的牧羊犬式导航分析。载于第二十四届国际人工生命与机器人学研讨会，499–503。