arXiv:2305.04773v1 [cs.RO] 8 May 2023

多足物质传输：一种用于噪声景观中运动的框架

BaxiChong[1,2], Juntao He[3],Daniel Soto[3],Tianyu Wang[3],
Daniel Irvine[4], Grigoriy Blekherman[4],Daniel I.Goldman[1, 2, 3, *]

[1]佐治亚理工学院定量生物科学跨学科研究生项目，美国佐治亚州亚特兰大市北大街，邮编30332[2]佐治亚理工学院物理学院，美国佐治亚州亚特兰大市西北州街837号，邮编30332[3]佐治亚理工学院机器人与智能机器研究所，美国佐治亚州亚特兰大市西北大西洋大道801号，邮编30332[4]佐治亚理工学院数学学院，美国佐治亚州亚特兰大市西北樱桃街686号，邮编30332

*致相关人士的信函 通信请联系；电子邮箱：daniel.goldman@physics.gatech.ed u

虽然轮式车辆或足式机器人在道路或轨道等人工构建的地形中能够确保物质运输，但在倒塌建筑物或农田等复杂环境中预测运动仍然颇具挑战。受信息传输原理的启发，这些原理能够让信号通过噪声信道可靠传输，我们提出了一种“物质运输”框架，证明在“噪声”粗糙地形（异质性尺度与运动器尺寸相当）上能够产生非惯性运动。实验确认，以串联连接的足式机器人为形式提供充足的空间冗余，可在此类地形上实现可靠运输，无需传感和控制。进一步的类比来自

通信理论与步态（编码）和基于传感器的反馈控制（错误检测与纠正）方面的进展相结合，可以实现复杂地形动力学状态下的敏捷运动。

引言

陆地上的物质运输对于社会和群体（*1,2, 8*）以及个体运动者（*3*）都至关重要。作为陆地物质运输手段，工程化自推进已在从巨型多轮列车到小型少轮足式机器人等多个尺度上得到研究（*4–6*）。对于大型设备而言，低耗散、惯性主导运动是一种常用的物质运输方案。具体而言，在轨道和道路等光滑表面上运行的轮式系统，除非受到耗散性内部力或外力的作用，否则其运动将持续很长距离（图 1.A）。

在自然地形上，外力造成的耗散可能源于与障碍物、间隙或斜坡等地形异质性的相互作用（*7*），也可能源于与可流动物质的相互作用（*9*）。在耗散主导型应用中，例如机器人在某些农业场景（如农田）或受限且拥挤的搜救场景（如倒塌建筑物）中的运动，系统必须持续主动地产生力和/或降低耗散。部分原因在于我们尚未充分理解与上述环境的地形动力学（*9,10*）相互作用，因此，尚缺乏能够保证可靠/可预测的物质运输的运动者设计与控制原则。

在复杂地形动力学状态下促进物质传输的一种工程解决方案（*11*），是使用类似肢体的结构，周期性地与环境建立和断开接触（*12*）。此类动态有望将推力相互作用简化为一系列离散单元，从而尽量减少意外干扰（*4*），为在“崎岖”地形上使用轮式载具提供另一种选择。在耗散——

主导环境。第一种方法高度依赖传感器（*13*），以实时检测并响应地形异质性（*5,14*）。这种方法用于最先进的腿式机器人（主要为双足或四足）的敏捷运动（*5,12, 14,15*）。然而，传感器和高带宽控制的使用成本高昂，且仅适用于特定应用。

第二种方法是赋予足式机器人“机械智能”，使其能够在对环境感知极少的情况下完成运动。这种方法在腿数超过四条的装置上最为有效，例如六足动物（*6*）和多足动物（*16,17*）。尽管更多肢体有助于避免灾难性故障（例如稳定性丧失），地形异质性仍会导致推力相互作用不足，从而显著降低运动性能（影片 S1 和（*18–20*））。由此引出一个问题：应如何布置数量可变的肢体和传感器，才能确保运动体在指定时间内穿越任意复杂的地形从 A 到达 B，并进一步界定所需的传感／反馈／带宽／控制量?

这个问题类似于近一个世纪前 Shannon 首次分析的噪声信道中的信息与信号传输问题（*21*）。在无噪信道上，连续模拟信号原则上能够传递无限量的信息（*22*）。尽管模拟信号效率很高，却可能受到所有通信模式中固有的信道噪声干扰而失真，这一特性与惯性驱动的物质传输类似。为抵消信道噪声，Shannon（*21*）设计了一种方案，其核心思想是将信息数字化（编码）为二进制比特序列，并通过冗余对传输错误进行“缓冲”（纠正）（图 1.C）。

类比信息论，至少在概念上，可以合理地预期：只要具有足够的陆地交互冗余，就能在噪声景观上实现可靠的物质传输。在此，我们说明这一预期是正确的，并由此形成一个物质传输的开环框架；借助该框架，对于复杂的地形动力学任务，我们可以保证足够的

冗余多足机器人能够通过“缓冲并容忍”动力学，在一定距离内可靠且可预测地自主移动，无需传感、反馈控制或环境感知（图 1.B、影片 S1 和（*16*））。

物质运输框架的构建

我们的框架如下所述（图 2）：我们将一项运输任务定义为一个物理实体在固定时间 T 到达特定目的地 D。如图 2.B.I 所示，这类似于以给定速率通过噪声信道传输预期消息。与基于比特的数字信号传输类似，我们关注耗散占主导地位的系统，其中运动由基本主动接触（bacs，即身体附肢；在此类比为比特）产生的推力相互作用驱动；这些接触是主动地形动力相互作用的离散单元。bacs 的例子包括与环境接触的肢体（*23*），以及无肢机器人中的接触垂直波（*24*）。我们将 bacs 的时空分布量化为二进制序列 X^m，其中 1 表示接触，0 表示非接触（图 2.B.II）。当运动系统在噪声地形上执行所需的 bac 序列（相当于噪声信道，图 2.B.III）时，地形不确定性可能会给实际 bac 序列引入接触噪声 Y^m（图 2.B.IV）。这会导致实际目的地 D（在预定时间 T 评估）与预期目的地 D 之间出现偏差（图 2.B.V）。

接下来，我们将讨论对噪声景观的表征与量化。以耗散为主导的地形可以具有不同类型的异质性，每种异质性都会对身体附肢产生不同而复杂的地形动力学效应（*9*）。考虑一种以高度图表征的地形，$h(x, y)$。根据梯度的尺度 $[\partial h/\partial x,\ \partial h/\partial y]$，地形异质性可能以斜坡、墙壁或障碍物的形式影响运动（图 1.B），并直接影响平行于地表平面的推力生成过程（例如，绊倒（*25*））。通过适当设计机械结构或采用被动

顺应机构可以尽量减少平行方向的推力扰动（见补充材料第 1.2 节及（*16,26*））。在此，我们聚焦于一类噪声景观（崎岖地形），其高度分布 $h(x, y)$ 会影响垂直于地表平面方向上的支撑力分布（例如，缺失的步伐），从而干扰预期的身体附肢序列（$X^m \to Y^m$）。

在建立了身体附肢和接触噪声的概念后，我们现在可以将物质传输建模为随机过程。首先，我们对一对腿所产生的推力进行抽象描述。我们将身体附肢上的瞬时推力 $f(t)$ 量化为在时间 $t \in [0,\ \tau)$ 维持运动体静止所需的瞬时外力，其中 τ 是身体附肢的持续时间。推力函数 $f(t)$ 的示例见图 3.A。标称（在平坦地形上不受扰动时的）平均推力为：$f_n = \frac{1}{\tau}\int_0^\tau f(t)dt$。

–

接下来，我们引入一个系数函数来表征 bac 中的不确定性，$c(t)$。地形扰动下的推力可表示为 $\hat{}\ f = \frac{1}{\tau}\int_0^\tau c(t)f(t)dt$。我们假设 $c(t)$ 具有如下性质：$\frac{1}{\tau}\int_0^\tau c(t) = 1$，从而使支撑力与重力保持平衡。此外，我们假设 bac 的启动会延迟一段时间 c_1，且 bac 的持续时间会缩短至τ_u：$\{c(t) = 0, t \notin [c_1,\ c_1 + \tau_u]\}$。具体而言，假设 c_1 是服从均匀分布 $c_1 \sim U(0, \tau)$ 的随机变量，而 bac 的持续时间 τ_u 则是一个由地形崎岖度决定的随机变量。我们从累积分布函数 $G(\tau_u) = (1-b)\tau_u/\tau + b$, $\tau_u \in [0,\ \tau]$ 中采样 τ_u，使得 bac 完全丧失具有非零概率：$p(\tau_u = 0) = b$，而 $b < 1$ 则表征接触噪声水平，并提供对地形粗糙度的近似（图 3.C）。当 $c_1 + \tau_u > \tau$ 时，我们将过长的接触持续时间（$c_1 + \tau_u - \tau$）延续至下一个 bac 中（图 2.B.III 和补充材料第 1.4 节）。为简化起见，我们假设在其他情况下，$c(t)$ 在 bac 期间服从均匀分布：$\{c(t) = \tau_u^{-1}\tau,\ t \in [c_1,\ c_1 + \tau_u]\}$。由此，受地形扰动的平均推力可简化为：$\hat{}f = \text{sign}(\tau_u)\tau_u^{-1}f_u$，其中 $f_u = \int_{c_1}^{c_1+\tau_u} f(t)dt$ 为推力扰动。符号函数 $\hat{}\ \text{sign}(\tau_u)$ 表示，当 bac 完全丧失（$\tau_u = 0$）时，将不会产生推力（$f = 0$）。

正如先前关于耗散主导的多足运动的研究（*27,28*）所指出的，由于肢体抬起与着地的周期性过程，在摩擦环境中会形成一种周期平均推力—速度关系（分别为一个周期内的平均推力和平均速度），且该关系表现出有效黏性（依赖速率）的特性，尽管推力在瞬时并不依赖于速度。具体而言，推导得出周期平均的机器人运动速度与周期平均推力呈线性相关：$\hat{v} = \gamma^{-1}\hat{f}$，其中 γ 为有效黏性阻力系数（图 3.D）。由此，地形扰动速度可近似为 $\hat{v} = \gamma^{-1}\,\mathrm{sign}(\tau_u)\tau_u^{-1} f_u$。

借鉴信息论中利用冗余比特限制信道噪声所带来的不确定性的类比，我们假设，具有冗余身体附肢的运动系统能够在地形不确定性下提供稳健性。一种引入冗余的直接方案是通过允许更长的运输时间来降低运输速率（时间冗余）。因此，我们有：

$$\hat{v}_T^{[1]} = \frac{1}{\gamma T}\sum_{i=1}^{T}\mathrm{sign}(\tau_u^i)\frac{f_u^i}{\tau_u^i}, \tag{1}$$

其中，$\hat{v}_T^{[1]}$ 是经过 T 个周期后的平均地形扰动速度，τ_u^i 和 f_u^i 分别是第 i 个周期内的接触扰动和推力扰动。T 表示时间冗余的阶数。我们预计，平均地形扰动速度 $\sigma^2(\hat{v}_T^{[1]})$ 的方差会随着 T 的增加而减小。此外，当 T 趋于无穷时，$\hat{v}_T^{[1]}$ 会收敛到狄拉克δ函数（证明见补充材料中的命题3）。同时，平均地形扰动速度的期望值 $\langle\hat{v}_T^{[1]}\rangle$ 保持不变（大数定律）。

接下来，我们评估这种时间冗余方案的有效性。为简单起见，我们假设 D 是一维的，$\hat{D}_T^{[1]} = T\hat{v}_T^{[1]}$，并且注意到，没有理由认为随着 T 增加，$\hat{D}_T^{[1]}$ 会收敛。因此，时间冗余只能保证完成物质运输任务，但确切的运输持续时间可能没有定限。

鉴于时间冗余效率低下，我们借鉴香农的编码方案，构建一个框架，以消除低效冗余，并用“恰当类型的冗余”(*29*)[p. 164]来加以弥补，从而实现更有效的运动。具体而言，恰当的冗余有助于身体附肢同时进行“通信”（例如重新分配），以应对接触噪声。为了构建一个适用于腿式系统的具体情境，我们考虑以重复串联模块的形式实现冗余，其中一个模块定义为一对腿。通过适当的协调，接触噪声的影响将由所有身体附肢共同分担，而非作用于单个身体附肢。由于这种冗余分布在空间域中，我们称之为空间冗余。实际上，这种空间冗余相当于对接触噪声曲线进行移动平均滤波。为简单起见，我们考虑一种简单的模块协调方式：每个模块上的瞬时推力 $f(t)$相同，且不随模块数量变化。 N 个串联模块在 T 个周期内的平均地形扰动速度为：

$$\hat{v}_T^{[N]} = \frac{1}{\gamma T}\sum_{i=1}^{T}\left(\operatorname{sign}(\sum_{j=1}^{N}\tau_u^{ij})\frac{\sum_{j=1}^{N} f_u^{ij}}{\sum_{j=1}^{N}\tau_u^{ij}}\right), \tag{2}$$

其中， τ_u^{ij}和 f_u^{ij}是第 i次时间重复中第 j个模块受到的扰动。直观而言，若第 i次时间重复中有 M 个生物执行器完全损失，$M = |\{j, \tau_u^{ij} = 0\}|$，那么具有 N个模块的运动器基本上会退化为具有 $N - M$ 个模块的构型。换言之，具有空间冗余 N 的运动器能够承受多达 $N - 1$ 个生物执行器完全损失而不会出现显著的推力不足，这表明空间冗余也可以用于限制推力生成的不确定性。我们证明，对于固定的$T \geq 1$，当空间冗余 N 趋于无穷大时，$\hat{}v_T^{[N]}$ 也将收敛到狄拉克δ函数（证明见补充材料命题4）。预期平均地形扰动速度$\langle\hat{}v_T^{[N]}\rangle$可近似表示为（$1 - b^N$）$C_s$，其中 C_s是由 f（t）、 γ和 b确定的常数（证明见补充材料命题4）。因此，更高的空间冗余不仅能降低

方差，还能提高预期平均地形扰动速度，这是仅靠时间冗余无法实现的特性。

对于任意固定的 T，实际目的地 $\hat{D}_T^{[N]} = T\hat{v}_T^{[N]}$ 的分布也会在 N 趋于无穷时收敛到狄拉克δ函数。给定一项预定时间 T、目标距离为 D 的物质运输任务，如果

$$||(\hat{D},\hat{T}) - (D,T)|| = |\hat{D}_T^{[N]} - D| < \epsilon,$$

其中 ϵ 为容差。这样，对于任意的 $\epsilon > 0$ 和 $p_0 < 1$，都存在有限的 N，使得物质传输成功的概率（容差为 ϵ）大于 p_0（证明见补充材料中的命题5）。达到概率 p_0、容差为 $\epsilon > 0$ 所需的“最小空间冗余”上界为：$N_{\epsilon,\ p_0} \leq \frac{\log(1-\sqrt[k]{D/p_0})}{\log(b)}$，其中$k$ 是描述平坦地形上运动速度的常数，D 是按距离指定的目标目的地（证明见补充材料中的命题5和命题6）。

框架的数值测试

我们首先通过数值模拟检验了理论预测。我们选择了一种基于生物蜈蚣肢体步态模式的 bac 时空分布模式（其在多足机器人中产生运动的效能此前已在（*27,30*）中得到研究）。每个 bac 产生的瞬时推力为 $f(t)$，且与我们对空间冗余的选择无关（证明见补充材料，命题 1）。我们在图 3.B 中展示了 $f(t)$。假设 $b = 0.5$，我们在图 3.E 中比较了不同时间和空间冗余组合下，归一化（除以标称速度v_{open}）的地形扰动速度 v/v_{open} 的分布。在此示例中，$C_s = v_{\text{open}}$ 表明，只要空间冗余足够，地形扰动速度就会收敛至标称速度（黑色虚线）。

为了说明 空间冗余使物质传输过程（定义为 th e

ˆ实际达到的距离 D 以及实现该位移所需的持续时间 T）收敛至ˆ期望的传输距离与持续时间组合（$D,\ T$），我们计算了 D 关于ˆ T 的90%置信区间，其中 $N = 8$ 对应红色曲线，$N = 1$对应蓝色曲线。图3.F展示了 T 与 D 的关系。随着空间冗余增加，D 的变化显著减小，并趋近于名义距离—持续时间关系的极限（黑色虚线）。此外，我们数值计算了不同容差 ϵ 下，成功进行物质传输的概率（在 $T = 1$处评估）随空间冗余 N 的变化（图3.G）。无论选择何种 ϵ，成功概率都会随着 N 增加而趋近于1。图3.G还表明，随着 N 增加，增加腿数所带来的边际收益会降低；预测的极限由黑色虚线表示。最后，地形崎岖度会影响运动性能。我们计算了$N_{\epsilon,\ p_0}$ 关于 b（即接触噪声水平）的函数关系，并将结果绘于图3.H。我们比较了三种 ϵ（容差）与 p_0（成功概率）的组合，发现地形越崎岖，所需的$N_{\epsilon,\ p_0}$越大（但仍有限）；当$p_0 = 0.9$时，理论上界由黑色虚线表示。

框架的实验测试

由于该模型假设环境相互作用经过简化，我们接下来测试了该框架能否预测现实世界中的运动性能。我们选择使用一种控制良好的实验室多足机器人物理模型（影片 S1；设计和控制细节见补充材料第 1.2 和 1.3 节），其设计与（*27, 30,31*）中的模型相似，并测量了这类不同腿数、处于不同地形复杂度下的机器人的平均速度及其变化。重要的是，鉴于我们的框架表明无需环境感知也能实现物质传输，我们对所有机器人进行控制，使其执行预编程步态（开环），不感知环境特征，也不对其作出响应。为便于比较不同空间冗余之间的差异

N，我们选定的 bac 序列（与数值测试中使用的序列相同）具有这样的性质：所有机器人共享相同的推力函数 $f(t)$、相同的平坦地形性能，以及相同的推力-速度关系（证明见补充材料，命题 2）。

我们构建了由高度各异的（10×10 cm^2）方块组成的崎岖地形实验室模型（图 4.A）。方块高度 $h(x,\ y)$呈随机分布（补充材料，第 1.1 节）。这种崎岖地形确保肢体会因随机接触而遭遇推力不足（*32*）。请注意，接触误差也可能源于机器人电机噪声，其原因包括驱动延迟、扭矩不足或身体柔顺性。我们将地形崎岖度 R_g定义为高度标准差除以方块边长。我们在崎岖地形上测试了由 3–8 个节段组成（具有 6–16 个方向柔顺肢体（*31*））的机器人物理模型，并记录了每条腿的 bac 持续时间（τ_u）。图 S5 展示了在粗糙度分别为 0.17 和 0.32 的地形上，基于 225 和 309 个 bac 测得的 τ_u 分布。对于 $0 < \tau_u < \tau$，测得的 τ_u 累积分布函数可用线性函数近似，这一特征与图 3.B 中假设的 bac 持续时间分布相符（因此也为该假设提供了依据）。

我们还记录了 12 足机器人在崎岖地形上连续迈出多步时（v/v_{open}）归一化的步间平均速度（跨越一个 bac 持续时间的步长内的平均速度），并将其与相应的归一化 bac 持续时间（τ_u/τ）进行比较，见图 4.B。具体而言，在每次试验中（每种地形进行 5 次试验），我们将机器人设定为运行两个周期，确保每条腿至少产生一次 bac（侧视摄像机可观察到 6 条腿）。这些量之间的相关性表明，bac 污染是运动速度变异性的重要来源，这与我们的模型假设一致。此外，我们测量了时间和空间冗余组合不同时平均 v/v_{open} 的分布（图 4.D）。具体而言，我们测量了 6 足机器人和 12 足机器人在每种地形上跨越 T 周期的平均位移（ T 见图 4.D）。The

测得的平均 v/v_{open} 的累积分布函数与数值测试的预测结果在定性上吻合（图 3.E）。数值测试与实验测试之间出现差异的原因包括：对地形特征的过度简化，以及机器人电机噪声导致的接触误差。

如前所述，对于给定的运输距离 D，运输持续时间的平均值和变化幅度都是评估物质传输性能的重要指标。我们测量了 6足机器人和 14足机器人在崎岖地形（$R_g = 0.32$）上运输持续时间（以周期数为单位）随 D 变化的情况。与图 3.F 中的数值预测类似，实验结果也表明，空间冗余可显著降低运输持续时间的变化幅度（以误差条表示）（图 4.C）。因此，在开环、非惯性物质传输过程中，即使身处有噪声的地形，我们也能保证速度具有可预测性和可靠性；这类似于在无噪声地形（如铁轨、道路）上惯性驱动动力学的可预测性。

为确定空间冗余如何影响运输持续时间，我们记录了 $T_{[D=60]}$，即机器人在 $R_g = \{0,\ 0.17,\ 0.32\}$ 上行进 60 cm 所需的时间，并比较腿数不同的机器人在崎岖地形上的表现（图 4.E，每种条件下进行 10 次试验）。六足机器人最终能够自行运输 60 cm，但 $T_{[D=60]}$ 的变化幅度很大。相比之下，拥有 16 条腿的系统能够以较短的平均时间和较小的变化幅度完成自行运输任务。此外，对于空间冗余度足够高的系统（例如 $N \geq 5$），进一步增加 N 不会使 $T_{[D=60]}$ 发生显著变化，其中包括平均值和变化幅度。这一发现与我们关于空间冗余边际收益的数值预测一致（图 3.G）。

根据 Shannon 的信号传输方案，可以合理预期，更复杂的编码方案能够带来更好的性能。我们将其定义为对身体附肢的地形动力学交互模式进行设计（例如，瞬时推力函数 $f(t)$ 以及推力-速度

关系）。调制身体附肢交互模式的一种直接方法，是改变身体波幅（*27*）或身体波的数量（*33*），从而改变身体附肢的时空分布及其相关的身体姿态。为展示适当编码的潜力，我们给出一个步态设计调制的示例。具体而言，我们沿身体施加了一种垂直波，使身体附肢的持续时间（τ）得到主动且系统性的缩短（接触调制，见补充材料第1.5节）。我们测试了接触调制（CM）多足机器人在崎岖地形上的表现，观察到其在不同地形崎岖度下的运动鲁棒性有所提高（表现为更小的误差条），但标称速度 v_{open} 有所降低（图4.E中紫色矩形虚线框）。此外，通过采用足够的空间冗余（$N = 6$）以及接触调制，我们的多足机器人能够在完全开环操作下穿越多样的实验室环境（障碍物、斜坡和墙壁）（图1.B及影片 S1），以及类野外环境（颗粒介质、卵石和岩堆）。

讨论

我们的框架的价值之一，在于明确阐释了冗余的益处：无需传感，也能提升运动能力，使其在与环境接触出现“误差”时保持稳健。这与传统基于传感器的闭环控制中占主导地位的接触误差预防范式形成对比；后者利用来自环境的视觉、触觉或关节扭矩信息来改变机器人动力学（*5,14*）。这样一来，物质运输的复杂性便可从实时反馈控制（例如处理传感器信息流）转移到预编程步态设计。因此，我们的框架简化了搜救（*34*）、地外探索（*35*）乃至微型机器人技术（*36*）等物质运输任务。在这些场景中，尽管机器人部署往往更受青睐，但由于地形动力学相互作用难以预测且传感器不可靠，部署仍颇具挑战性。

然而，当机器人“受困”或地形动力学相互作用发生显著变化时（例如，从低粗糙度地形转移到高粗糙度地形），感觉反馈显然能发挥作用。在这种情况下，机器人能够了解自身状态（通过本体感觉或外感受）（*13*），并据此改变运动状态。信息论中的一个类比是，错误检测编码可通过感觉反馈控制增强我们的框架：在错误检测编码中，“反向信道”的存在能够促进信号重传，从而提高信号传输的准确性（*21,29*）。引入反馈可以提升噪声信道的容量，进而降低编码复杂度（*37*）。我们认为，运动中的基于传感器的框架与错误检测编码具有类似的机制。当运动系统已经配备了冗余的身体附肢（例如，许多条腿）时，增加更多身体附肢的益处可能微乎其微。在这些情况下，检测到 bac 污染的传感器（例如，监测足部接触的传感器）可以促进快速的环境适应（例如，全身步态适应或局部腿部落足位置适应），并进一步提升运动性能。因此，基于冗余和基于传感器的机制相结合，能够在具有挑战性的地形上提供独特优势，这一特点类似于信号传输中的混合自动重传请求方法（“混合自动重传请求”）（*38*）。

除了运动对人工运动体的重要性之外，我们认为，从生命系统物理学的视角来看，我们的物质运输框架还能帮助深入理解神经机械与形态演化的某些方面（*39*）。也就是说，从通过单一身体附肢对产生推进的动物（即双足动物）（*40,41*）到使用许多身体附肢的动物（即多足动物）（*42*），都能够穿越复杂的自然地形。我们假设，随着身体附肢数量（冗余度）的增加，环境感知和全身协调的重要性会降低（*42–44*）。因此，在生物陆地运动体中，似乎存在一种转变趋势：要么依靠较少的身体附肢，实现先进的神经机械控制；要么拥有冗余的身体附肢，同时采用简化的神经机械控制。将我们的框架与生物实验技术的进展相结合，

或许能够揭示多种控制架构的优势及其权衡。

参考文献

1. J. Aguilar，等，《科学》*361*，672（2018）。2. J. Mindell，H. Rutter，S. Watkins，《环境健康百科全书》（爱思唯尔·马松，2011），第578–589页。3. V. T. Inman，《加拿大医学会杂志》*94*，1047（1966）。4. P. Holmes，R. J. Full，D. Koditschek，J. Guckenheimer，《SIAM评论》*48*，207（2006）。5. M. Raibert，K. Blankespoor，G. Nelson，R. Playter，《IFAC会议论文集》*41*，10822（2008）。6. U. Saranli，M. Buehler，D. E. Koditschek，《国际机器人研究杂志》*20*，616（2001）。7. M. G. Bekker，《地面力学研究与发展》（1960）。8. H. Kreutzmann，《现代亚洲研究》*25*，711（1991）。9. C. Li，T. Zhang，D. I. Goldman，《科学》*339*，1408（2013）。10. C. Li，等，《仿生与仿生学》*10*，046003（2015）。11. W. Weber，E. Weber，《迪特里希书店出版社，G¨ *öttingen*（1836）。12. J. Lee，J. Hwangbo，L. Wellhausen，V. Koltun，M. Hutter，《科学·机器人学》*5*，eabc5986（2020）。13. J. Borenstein，H. R. Everett，L. Feng，D. Wehe，《机器人系统杂志》*14*，231（1997）。14. M. Hutter，等，《2016年IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议（IROS）》（IEEE，2016），第38–44页。

15. E. R. Westervelt，J. W. Grizzle，C. Chevallereau，J. H. Choi，B. Morris，《动态双足机器人运动的反馈控制》（CRC出版社，2018）。16. Y. Ozkan-Aydin，D. I. Goldman，《科学·机器人学》*6*，eabf1628（2021）。17. S. Aoi，等，《科学报告》*6*，30199（2016）。18. E. Moore，D. Campbell，F. Grimminger，M. Buehler，《2002年IEEE机器人与自动化国际会议论文集（目录号：02CH37292）》（IEEE，2002），第3卷，第2222–2227页。19. C. Ordonez，J. Shill，A. Johnson，J. Clark，E. Collins，《第十五届无人系统技术》（国际光学工程学会，2013），第8741卷，第240–251页。20. X. A. Wu，T. M. Huh，R. Mukherjee，M. Cutkosky，《IEEE机器人与自动化快报》*1*，1125（2016）。21. C. E. Shannon，《贝尔系统技术期刊》*27*，379（1948）。22. A. Feinstein，《IEEE信息论汇刊》（1954）。23. R. J. Full，D. E. Koditschek，《实验生物学杂志》*202*，3325（1999）。24. H. C. Astley，等，《美国国家科学院院刊》*112*，6200（2015）。25. H. Forssberg，《神经生理学杂志》*42*，936（1979）。26. M. Travers，J. Whitman，H. Choset，《国际机器人研究杂志》*37*，1253（2018）。27. B. Chong，等，《美国国家科学院院刊》*120*，e2213698120（2023）。

28. D. Zhao, B. Bittner, G. Clifton, N. Gravish, S. Revzen, 《美国国家科学院院刊》 **119**, e2113222119 (2022).

29. J. R. Pierce，信息论导论：符号、信号与噪声 (Courier Corporation，2012)。

30. B. Chong，等，《仿生与仿生学》 **17**，046015（2022）。

31. Y. Ozkan-Aydin, B. Chong, E. Aydin, D.I. Goldman, *2020*年第三届*IEEE*软体机器人国际会议（*RoboSoft*）（IEEE，2020），第156–163页。

32. A. Jacoff, A. Downs, A. Virts, E. Messina，第八届智能系统性能指标研讨会论文集（2008），第29–34页。

33. B. Chong，等，《国际机器人研究杂志》**40**，1547（2021）。

34. J. Whitman, N. Zevallos, M. Travers, H.Choset, *2018 IEEE*安全、防护与救援机器人国际研讨会（*SSRR*）（IEEE，2018），第1–6页。

35. N. D. Naclerio，等，《科学·机器人学》**6**，eabe2922（2021）。

36. J. J. Abbott、Z. Nagy、F. Beyeler、B. J. Nelson，《*IEEE*机器人与自动化杂志》**14**，92（2007）。

37. S. Tatikonda、S. Mitter，*IEEE*信息论汇刊**55**，323（2008年）。

38. C. Lott, O. Milenkovic, E. Soljanin, *2007 IEEE* 无线网络信息论研讨会（信息论研讨会）(IEEE, 2007), pp. 1–5.

39. B. Chong, T. Wang, E. Erickson, P. J. Bergmann, D. I. Goldman，美国国家科学院院刊**119**, e2118456119 (2022).

40. D. S. Marigold，运动与体育科学评论**36**, 145 (2008). 41. T. Krasovsky, A. Lamontagne, A. G. Feldman, M. F. Levin，步态与姿势**39**, 378 (2014).

42. K. Diaz、E. Erickson、B. Chong、D. Soto、D. I. Goldman，《实验生物学杂志》（2023）。

43. S. Sponberg, R. Full,《实验生物学杂志》**211**, 433 (2008).

44. B. Bl¨asing、H. Cruse，《比较生理学杂志 *A*》**190**，173（2004）。

45. Daniel Soto 和 Baxi Chong。（2022）。崎岖地形生成代码。https://doi.org/10.5281/zenodo.7121219

46. D. L. Hu, J. Nirody, T. Scott, M. J. Shelley, 美国国家科学院院刊**106**, 10081 (2009).

47. A. Gut,《概率论：研究生课程》。第 *2* 版 (2005)。

致谢

我们感谢 Todd Murphey 教授、Paul Umbanhowar 教授、Guillaume Adrien Sartoretti 教授、Di Luo 博士、Thomas Berrueta 以及 Xiaoxiao Sun 提供有益的讨论。我们感谢 Kelimar Diaz 校对。**资助：** 作者感谢以下资助：NSF-Simons 东南数学与生物学中心（Simons Foundation SFARI 594594）、Georgia Research Alliance（GRA.VL22.B12）、陆军研究办公室（ARO）MURI 项目、陆军研究办公室资助项目 W911NF-11-1-0514 以及 Dunn Family 教授职位。**作者贡献：** B.C. 设计了研究/模型，并进行了数值模拟。J.H. 为机器人物理实验收集了原始数据。J.H.、T. W.、D.S. 和 B.C. 搭建了实验平台。D.I.、G.B. 和 B.C. 完成了数学证明。D.I.G. 负责监督研究。

所有作者均参与了稿件的撰写，并参与了结果的解读。我们认为，本文的部分主题可能涉及一项或多项待审专利申请，例如题为“用于多样地形行进的设备与系统及其使用方法”的 PCT专利申请号 PCT/US2022/043362；该申请主张享有美国临时专利申请号 63/243,435（于 2021年9月13日提交）以及美国临时专利申请号 63/318,868（于 2022年3月11日提交）的优先权。**利益冲突：** 作者声明不存在任何利益冲突。**数据和材料可用性：** 支持本文论述的所有数据均可在 Zenodo 存储库（46）中获取。

补充内容列表

材料与方法 s

补充文本 图 S1 至 S6 影片 S1 图注
参考文献 *(47-48)*

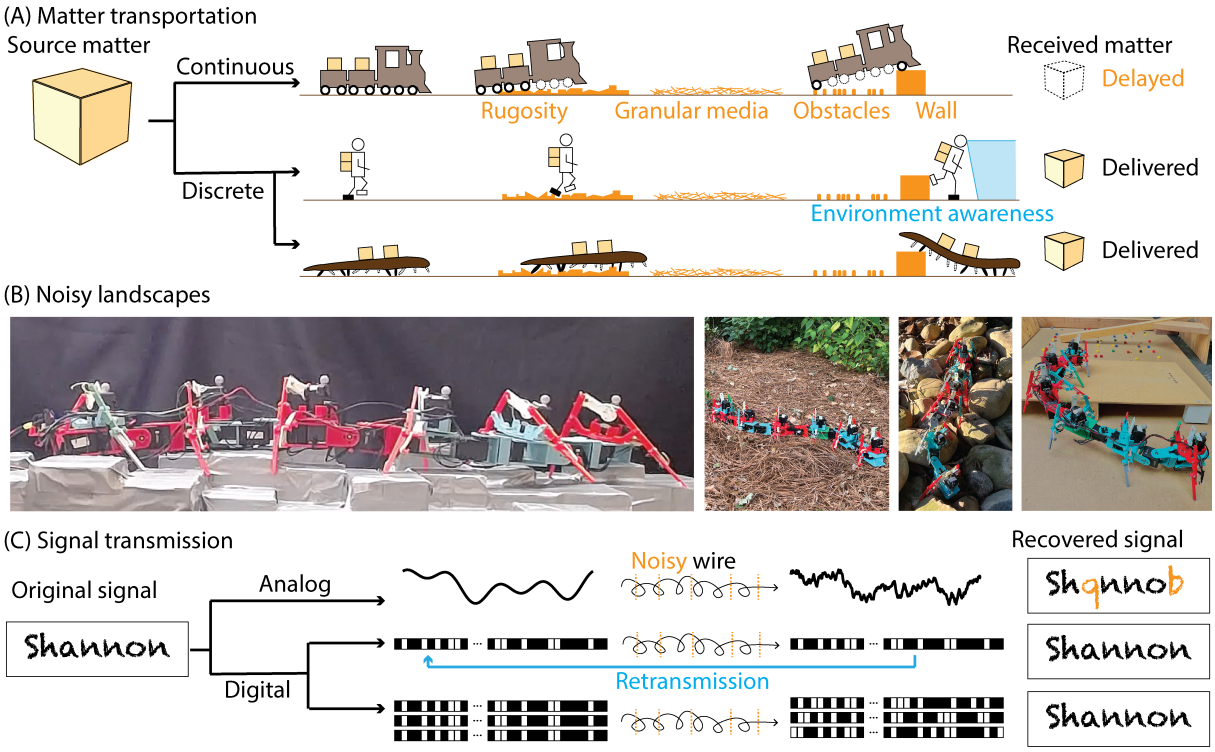

图 1：**信号传输与物质传输**。(A) 在无噪声轨道上，采用连续和离散主动接触的物质传输都能有效进行。离散冗余接触可通过冗余或环境感知，在崎岖轨道上实现有效的物质传输。(B) 采用方向顺应性腿的多节段机器人运动体穿越噪声景观：（从左至右）崎岖地形的实验室模型、缠结的颗粒介质、卵石和楼梯（斜坡）。(C) 信号传输范式。我们比较噪声线路中的模拟信号传输与数字信号传输。数字信号可通过冗余或重传通道，在噪声线路中实现可靠传输。

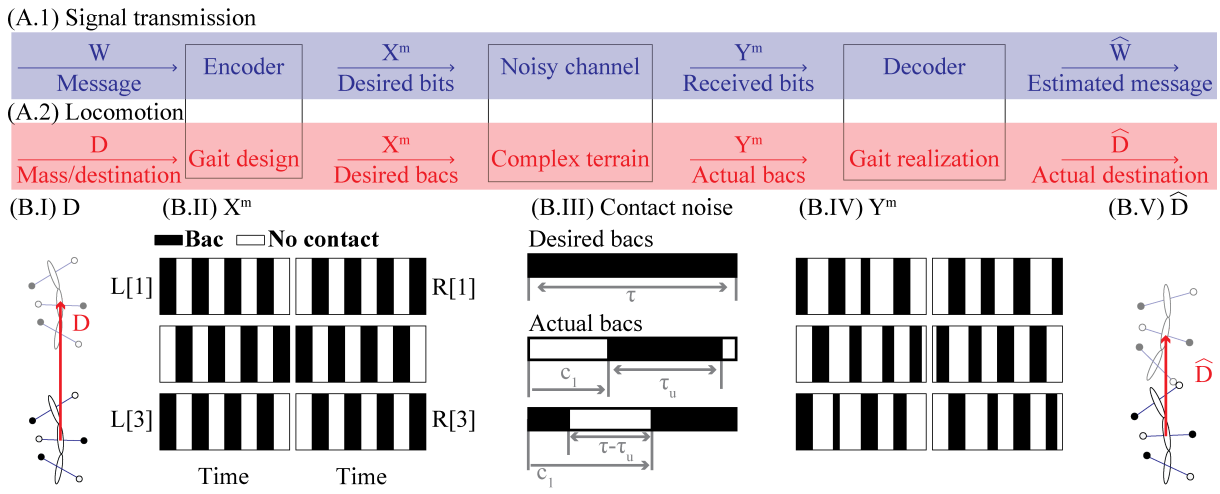

图 2：**将物质传输问题构建为一系列基本主动接触（bacs）**。(A) (A.1) 信号传输（改编自（*21*））和 (A.2) 运动（物质传输）中各过程的对应关系。(B.I) 一台多足机器人，以及需要运输至目的地的物质 D。(B.II) 到达运动目的地所需的目标 bac 序列。(B.III) 噪声景观可能引入接触误差，例如延迟 bac 的发生时间以及缩短 bac 的持续时间。我们比较目标 bac（持续时间为 τ）与两个受地形干扰的 bac（均始于 c_1），后者的持续时间更短（τ_u）。(B.IV) 受到ˆ接触误差干扰的 bac 序列会导致 (B.V) 运动目的地 D 小于预期值 D。

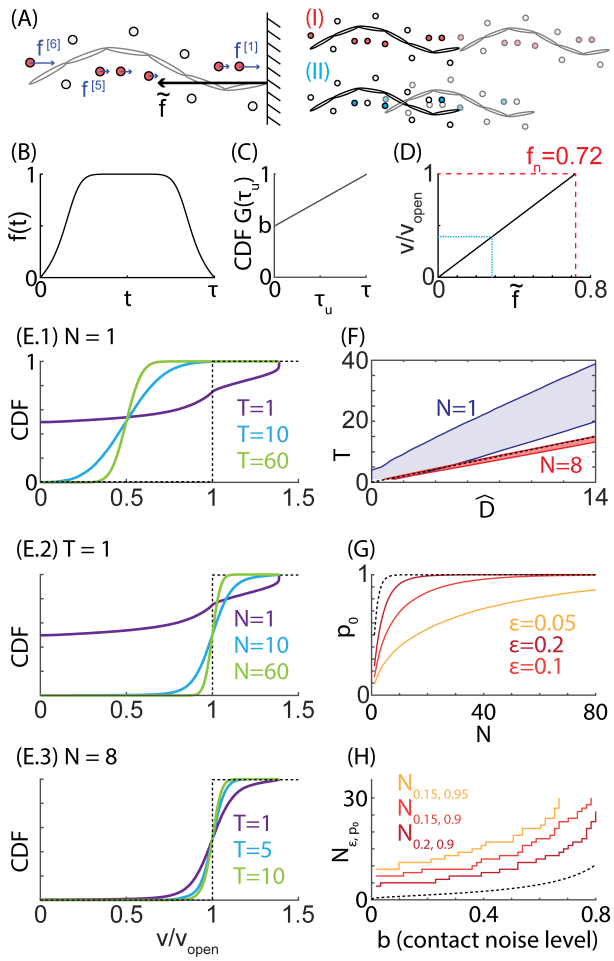

图 3：**用于检验物质运输框架的数值模拟**。**(A)**（左）身体附肢产生推力的示意图，以及（右）推力-速度关系示意图。对比了（I）标称接触和（II）存在接触误差时的自推进情况。**(B)** 根据（*27*）得出的瞬时推力 $f(t)$ 随时间的变化。**(C)** τ_u 的累积分布函数（CDF）。**(D)** 推力-速度关系（以标称速度归一化）。**(E)** 具有不同时间冗余（T）和空间冗余（N）组合的机器人，其地形扰动速度的数值累积分布函数。在所有子图中，黑色虚线表示标称累积分布函数。**(F)** $\hat{}$ 实际目的地 D 的数值计算 90%置信区间随 T 的变化。我们比较了 $\hat{}$ 两种空间冗余：$N = 1$（蓝色）和 $N = 8$（红色）。黑色虚线表示标称 D-T 关系。**(G)** 在不同容差 ϵ 下评估的成功的计划物质运输概率（p_0）随空间冗余的变化。黑色虚线表示理论预测极限。**(H)** $N_{\epsilon,\, p_0}$（在容差 ϵ 条件下达到预期成功概率（p_0）所需的最小空间冗余）与 b（接触噪声水平）之间的关系。黑色虚线表示当 $p_0 = 0.9$ 时的理论预测极限。

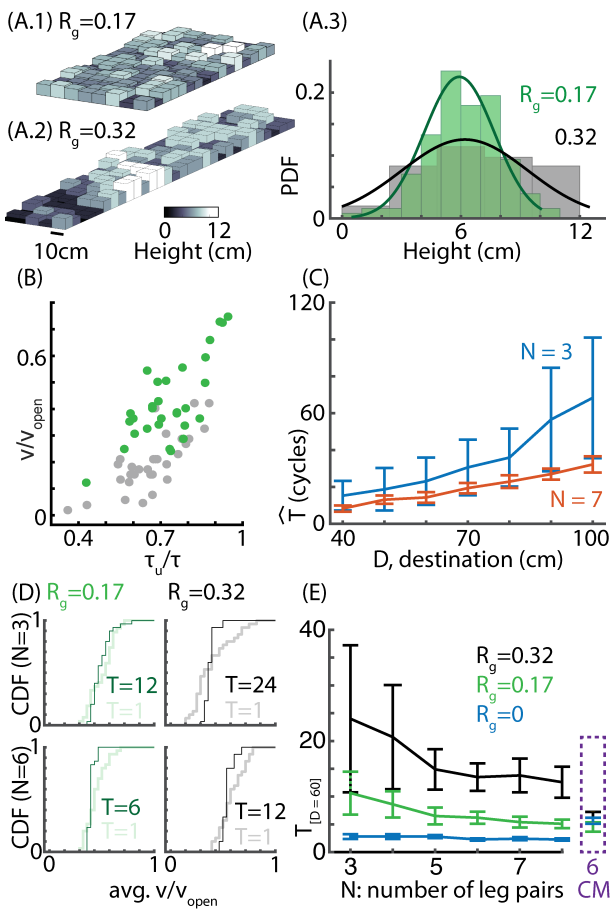

图 4：**多足机器人物质运输框架的实验测试**。(A) 粗糙度为 (A.1) $R_g = 0.17$ 和 (A.2) $R_g = 0.32$ 的崎岖地形渲染图。右侧面板显示块体高度分布。(B) Bac 污染会导致 12 足机器人在崎岖地形上的速度下降。每个点表示机器人在一次 bac 中的归一化步间平均速度 v/v_{open}) 以及相应的接触持续时间 (τ_u/τ)。ˆ 配色方案与 (A) 相同。(C) 经验运输持续时间 (T，单位：步态周期) 随目的地距离 D 的变化。我们比较了两种机器人，分别有 14 条腿（红色）和 6 条腿（蓝色）。6 足机器人的运输持续时间变化很大，且这种变化随目的地距离增加而增大。14 足机器人的运输持续时间则相对稳定，波动范围较小。(D) 在粗糙度为 (左) $R_g = 0.17$和 (右) $R_g = 0.32$ 的地形上，(上) 6 足机器人和 (下) 12 足机器人的平均速度经验分布。经验分布基于 30 次试验得出。(E) 对于足对数量不同的机器人 N，我们记录了 $T_{[D=60]}$，即在粗糙度为（蓝色） $R_g = 0$、（绿色） $R_g = 0.17$和（黑色） $R_g = 0.32$ 的地形上运输 $D = 60$ 厘米所需的周期数。误差条根据至少 10 次试验计算得出。紫色矩形中展示了接触调制步态的 $T_{[D=60]}$ 。