基于三重对称布里卡德并联机构的新型可重构灵巧手

Chunxu Tian[1], Zhichao Huang[1], Hongzeng Li[1],Bo Wang[1],Jinghao Jia[1],Yirui Sun[1],和 Dan Zhang[2], †

arXiv:2603.00892v1 [cs.RO] 1 Mar 2026

摘要—**本文介绍了一种基于并联机构的机器人手新型设计。所提出的机器人手采用三重对称布里卡德连杆机构作为可重构手掌，从而增强了对不同形状和尺寸物体的适应性。通过拓扑与尺寸综合，该机构实现了均衡的自由度和连杆构型，适用于可重构手掌运动，并兼顾灵巧性、稳定性和承载能力。此外，本文运用螺旋理论和闭环约束进行运动学分析，并根据工作空间、刚度以及运动/力传递效率评估其性能。最后，研究团队制作了一个原型，并通过一系列抓取实验进行测试，结果表明，该原型能够对各种物体进行稳定、高效的操作。实验结果验证了该设计在提升抓取多样性和操作精度方面的有效性，为先进机器人操作任务提供了一种有前景的解决方案。**

I. 引言

灵巧机器人操作器已成为一类具有广阔应用潜力的新型机器人末端执行器。其多自由度（DOF）结构，结合多传感能力、优异的适应性以及多样的抓取模式，使其成为工业机器人学的重点研究方向。过去几十年来，灵巧操作器的设计稳步发展 [1], [2]。大多数灵巧夹爪采用仿人布局，由腱索或缆绳驱动串联转动关节，并常结合弹簧或其他柔顺元件以实现欠驱动行为 [3], [4], [5], [6]。然而，传统结构的刚性限制了其对几何形状、尺度和表面特性各异的物体的适应性。

多指灵巧手具有出色的适应性。与串联结构相比，采用并联机构（PM）的灵巧手具有更高的刚度和稳定性，因此在复杂抓取任务中能够实现更高的精度和灵活性，同时增强操作器的承载能力 [7]。这些优势使并联结构灵巧手能够快速响应并以高定位精度完成抓取和捏取任务。2002 年，Lee 和 Tsai [8] 将 PM 理论引入灵巧手的综合设计中，但其手指仍采用串联结构。在指尖抓取过程中，多自由度手在运动学上等效于 PM——物体相当于动平台，而手指则相当于运动学支链。这一观点随后推动了平移运动的发展，使其成为实现高精度、高负载灵巧操作器的有效基础 [9], [10], [11]。

近年来，Dai 等人 [12] 设计了一种带有可重构手掌的多指灵巧手。该设计采用可重构机构作为手掌，不仅扩大了灵巧手的工作空间，还增强了其灵巧性，从而为固定手掌问题提供了一种新颖的解决方案。然而，目前关于灵巧夹持器手掌的研究主要集中于结构设计和控制优化，往往忽视了抓取过程中手掌自身姿态和形状的作用。因此，一些学者开始研究采用可重构机构的手掌 [13], [14]。例如，Patricia 等人[15] 设计了一种模块化二自由度可变形手掌。在不增加额外电机的情况下，柔性协同驱动机构使手掌和手指的运动同步，从而改善了工作空间和抓取适应性。Lu 等人 [16] 设计了一种可重构欠驱动灵巧手，该手具有三根欠驱动手指和一个可重构手掌，能够通过精确的手掌操作抓取各种物体。
Wei 等人[17] 提出了一种可重构灵巧手的几何设计与尺寸综合方法，研究了设计参数对手掌和手指工作空间的影响。

然而，目前关于灵巧机器人手的研究主要集中于结构设计和控制优化，忽略了抓取过程中手掌自身姿态和形状的作用。在复杂环境中抓取不同物体时，手掌姿态、手掌形状和手指角度等因素会显著影响抓取成功率。本研究旨在设计一种具有多种运动模式且手掌姿态可调的通用并联可重构灵巧手。本文结构安排如下：第 2 节通过讨论回路闭合和收缩图（CGs），建立拓扑分析框架。第 3 节对灵巧手进行运动学分析。第 4 节开展性能分析，包括工作空间、雅可比矩阵、运动/力传递分析以及稳定性/刚度分析。第 5 节对可重构灵巧手进行实验测试与分析。最后，第 6 节总结研究结果并提出未来的研究方向。

*本研究得到中国国家自然科学基金（批准号52305012）的资助。
[1]人工智能与机器人研究所，工程与技术学院，复旦大学，上海 200433，中国。[2]机械工程系，香港理工大学，红磡，香港。

†通讯作者：Dan Zhang（电子邮箱：dan.zhang@polyu.edu.hk）。

II. 图综合与结构设计

根据第 I 节确定的设计要求，本节重点介绍一种闭合

表 I： $V = 1/2/3/4$ 的基本构件组合。

V	No.	n_2	n_3	n_4	n_5	V	No.	n_2	n_3	n_4	n_5
1	1	$5+\Phi$	0	0	0	1	9	$14+\Phi$	6	0	0
2	2	$8+\Phi$	2	0	0	2	10	$15+\Phi$	4	1	0
2	3	$9+\Phi$	0	1	0	2	11	$16+\Phi$	3	0	1
2	4	$11+\Phi$	4	0	0	2	12	$16+\Phi$	2	2	0
2	5	$12+\Phi$	2	1	0	2	13	$17+\Phi$	2	0	1
2	6	$13+\Phi$	1	0	1	3	14	$17+\Phi$	1	1	0
3	7	$13+\Phi$	0	2	0	3	15	$17+\Phi$	0	3	0
3	8	$14+\Phi$	0	0	1	3	16	$18+\Phi$	0	1	1
4	–	–	–	–	–	4	17	$18+\Phi$	0	0	2

适用于可重构手掌的回路机构。

A. 灵巧手的回路与自由度

对于空间平面机构，活动度可通过修正的 Gr¨ ubler-Kutzbach 公式 [18]计算：

$$M = 6(n-g-1) + \sum_{i=1}^{g} f_i + v - \zeta, \tag{1}$$

其中， M 表示机构的自由度，n为构件总数， g 为运动副数量， f_i 为第 i个运动副的自由度。 v 为被动自由度的数量， ζ 为冗余约束数量。

为简化拓扑综合，我们引入基本构件，其中， n_k 为具有 k 个运动副的基本构件数量。总构件数 n 和运动副数 g 分别为：

$$n = \sum_{k=2}^{m} n_k, \qquad g = \sum_{i=1}^{g} f_i = \frac{1}{2}\sum_{k=2}^{m} k\, n_k. \tag{2}$$

机构的独立回路数 V 可根据欧拉公式 [19]计算：

$$V = g - n + 1 = \frac{1}{2}\left(n_3 + 2n_4 + 3n_5 + \cdots\right) + 1. \tag{3}$$

将上述方程代入后，可得二元连杆数 n_2，这是定义机构拓扑的关键参数：

$$n_2 = 5V - \sum_{k=3}^{n} n_k + \Phi, \tag{4}$$

其中 $\Phi = M + \zeta - v - 1$。柔顺拓扑结构通过从基本连杆组合构建连接图而综合得到，如表 I 所示。

B. 拓扑图与同构识别

尽管 $V = 2$或 $V \geq 4$ 对应的构型在理论上可行，但 $V = 2$ 的结构复杂度不足以实现空间重构，而V 取值较高则会显著增加机械复杂度并降低刚度。因此，$V = 3$ 是在可重构性、对称性和结构稳健性之间权衡后的选择。拓扑图以节点表示关节、以边表示连杆，用于展示它们之间的连接关系。为了兼顾高灵活性和承载能力，灵巧手的设计

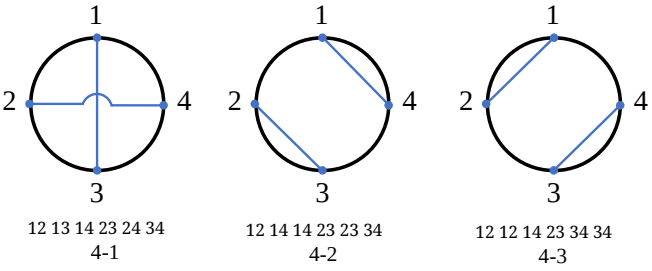


图1：拓扑图与连接矩阵。

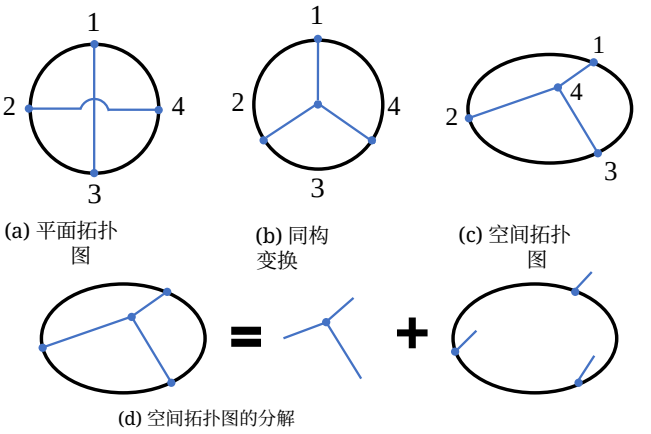


图2：图的变换与分解。

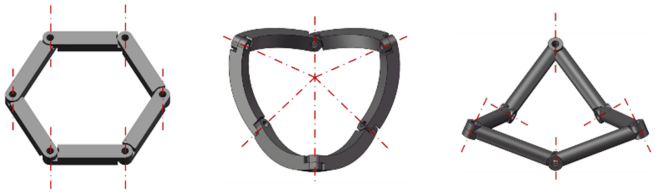
需要在刚度、灵巧性和复杂性之间进行权衡。该设计设定 $V = 3$ ，并采用表 I 中的构型4，该构型包含四个三元连杆（T）和（$11+\Phi$）个二元连杆。以四个三元连杆为核心，仅有一种周向排列（$TTTT$），由此得到三个有效的拓扑图 [20], [21]。为避免不同图形表示造成冗余，需要进行同构识别。通过对基本构件编号，将每个连接关系转换为数学数组，如图1所示。

本研究采用节点响应法（NRM）进行分析 [22]。NRM 通过模拟逐层响应传递，并比较不同初始节点得到的输出序列来验证同构性。该过程得到了两个具有设计潜力的非同构图：4-1 和 4-2。

在机构设计中，通常优先采用对称结构，以便于分析、制造和维护。CG 4-1 具有三重对称空间拓扑，三个相同的支链连接到一个顶点。这种对称性提高了承载能力和稳定性。因此，选定 CG 4-1，其各种形式如图2所示。

C. 基于拓扑图的结构设计

对 CG 4-1 空间拓扑进行分解后，可以看到三条支链，每条支链各包含一个三元连杆（1、2 或 3）。每条支链上的一个运动副连接至基座（4），另两个运动副则将各支链依次串联。利用这种三重对称性，我们设计了一种三指对称手。



(a) Planar six-bar (b) Spherical six-bar (c) Bricard

图 3：对称六杆机构



(a) Link configuration (b) Contracted state (c) Overall structure

图 4：三重对称布里卡德机构的结构设计

由此形成一个六杆闭环，手指安装在三元连杆 1、2 和 3 之间的二元连杆上。

在对称六杆机构的多种方案中，选择布里卡德机构 [23] 用于可变形手掌，因为其空间可展开性能够提供更出色的手掌灵活性和适应性，如图 3 所示。该结构具有更大的运动范围和可扩展性，因此应用广泛。

选定一种三重对称布里卡德机构变体后，设计了两个三维模型，如图 4 所示。模型 4(a) 结构简单，但由于制造误差，精度较低。模型 4(b) 结构更复杂，并通过定位孔确保更高精度；本文采用精确的图 4(b) 构型，最终结构如图 4(c) 所示。

III. 机构运动学分析

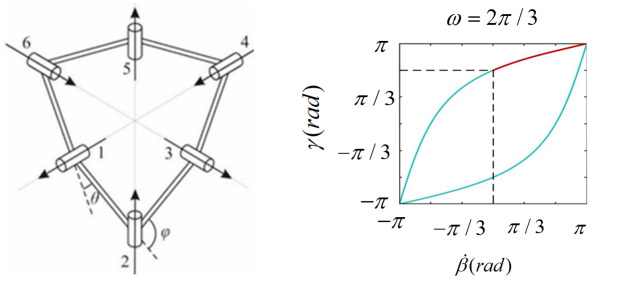
A. 灵巧手的结构分析

根据连杆数量及其构型的不同，布里卡德机构呈现出不同的结构特性。根据 Denavit-Hartenberg (DH) [23]，，当且仅当沿回路所有齐次变换矩阵的有序乘积等于单位矩阵时，单环机构才具有活动度，即：

$$\prod_{i=1}^{n} \mathbf{T}_{i(i+1)} = \mathbf{I}, \tag{5}$$

其中$\mathbf{T}^{i(i+1)}$ 表示连杆之间的传递矩阵。该机构具有三重平面对称性和旋转对称性，其几何条件如图5(a)所示，并满足如下条件：

$$\begin{cases} a_{12} = a_{23} = a_{34} = a_{45} = a_{56} = a_{61} = l \\ \alpha_1 = \alpha_3 = \alpha_5 = \omega \\ \alpha_2 = \alpha_4 = \alpha_6 = 2\pi - \omega \\ \beta_1 = \beta_3 = \beta_5 = \beta \\ \gamma_1 = \gamma_3 = \gamma_5 = \gamma \end{cases} \tag{6}$$



(a) (b)

图 5：（a）三重对称布里卡德机构，其中 β 和 γ表示局部连杆坐标系中定义的相邻转动关节的转角；（b） β 和 γ 随 $\omega = 2\pi/3$变化的对应曲线。

如图5(a)所示，三重对称布里卡德机构具有三个对称平面，兼具旋转对称性和平面对称性。因此，该机构被用作灵巧手的手掌。根据DH闭环条件(5)和几何参数(6)，可推导出该机构的运动协调方程：

$$\begin{aligned} &\sin^2\omega(\cos\beta + \cos\gamma) + (1 + \cos^2\omega)\cos\beta\cos\gamma \\ &\quad + \cos^2\omega - 2\cos\omega\sin\beta\sin\gamma = 0 \end{aligned} \tag{7}$$

在式（7）中， ω 表示相邻关节之间的夹角，而 β 和 γ为连杆转角变量。通过设定 $\omega = 2\pi/3$，可确保连续运动，同时最大化工作空间并避免干涉。

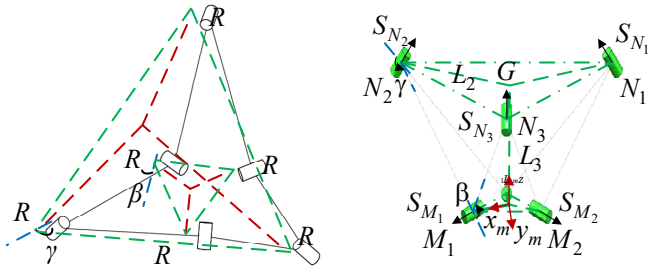
选择 β 作为输入，将可行域限制在 $\beta \in (0, \pi)$ 和 $\gamma \in (2\pi/3, \pi)$，以消除分岔歧义。因此，每个 β 都对应唯一的 γ，如图 5(b) 中的红色曲线所示。其关系为：

$$5\cos\beta\cos\gamma + 4\sin\beta\sin\gamma + 3\cos\beta + 3\cos\gamma + 1 = 0 \tag{8}$$

给定 ω 和 β 与 γ的可行范围，三重对称布里卡德机构的示意构型如图 6(a)所示。在该机构中，每对不相邻的转动关节交于同一点（红线所示），这些转动关节的中心构成两个平行的等边三角形（绿线所示）。连接两个交点的直线垂直于两个三角形平面，从而保证了机构的几何对称性。

如图 6(b)所示， M_i和 N_i（$i = 1, 2, 3$）分别表示连接手掌与运动链和手指的转动关节中心。机构中的每根连杆均以 M_iN_i表示。由于具有三重对称性，$\triangle M_1M_2M_3$ 和 $\triangle N_1N_2N_3$ 是平行的等边三角形，构成了该机构的基本几何结构。

在 $\triangle M_1M_2M_3$平面上建立参考坐标系 $O_m - x_m y_m z_m$，原点 O_m 位于其形心处。 x_m轴连接 O_m 与 M_1， z_m轴垂直于平面 $\triangle M_1M_2M_3$， y_m轴则由右手定则确定。点 G定义为



(a) (b)

图 6: （a）三重对称布里卡德机构示意图；（b）对应的螺旋系表示。

$\triangle N_1N_2N_3$的形心。 M_i 和N_i 处的运动旋量分别记为 S_{M_i} 和 S_{N_i}，其中 β 为输入角， γ 为被动角。

布里卡德机构的长度用 L表示。为便于计算，令 $O_mM_1 = O_mM_2 = O_mM_3 = L_1$、$GN_1 = GN_2 = GN_3 = L_2$ 和 $O_mG = L_3$。参数L_1、 L_2 和 L_3 可用 L、 β和 γ表示。

$$\begin{cases} L_1 = \dfrac{2\sqrt{3}}{3} L\cos\dfrac{\gamma}{2}, \\ L_2 = \dfrac{2\sqrt{3}}{3} L\cos\dfrac{\beta}{2}, \\ L_3 = L\sqrt{1 - \dfrac{4}{3}\cos^2\dfrac{\gamma}{2} - \dfrac{4}{3}\cos^2\dfrac{\beta}{2} + \dfrac{4}{3}\cos\dfrac{\gamma}{2}\cos\dfrac{\beta}{2}} \end{cases} \tag{9}$$

B. 正向运动学分析

在所提出的灵巧手模型中，我们指定 L_1 为输入变量， L_3 为输出变量，以描述动平台在坐标系中的位置，从而建立正向运动学。结合方程（8）、（9）和倍角公式，并消去 β 和 γ，可得 L_1 和 L_2之间的约束方程:

$$45L_1^2L_2^2 - 12L^2(L_1^2 + L_2^2) + 48L^2L_1L_2\sqrt{A}\sqrt{B} = 0. \tag{10}$$

其中 $A = 1 - 3L_1^2/4L^2$ 和 $B = 1 - 3L_2^2/4L^2$。根据方程（10），可以将 L_1和 L_2 之间的约束关系可视化，如图 7（a）所示。由于$\beta \in (0,\ \pi)$、 $\gamma \in (2\pi/3,\ \pi)$，因此 $L_1 \in (0,\ \sqrt{3}L/3)$、$L_2 \in (0,\ 2\sqrt{3}L/3)$，由此得到条件 $L_1 < L_2$。在此条件下，手掌具有更强的伸展能力，从而扩大了手指运动的工作空间，提升了手部的灵巧性。因此， L_1 和 L_2 之间的关系由图 7（a）中的红色曲线表示，这表明在该区间内，对于任意 L_2，都存在唯一对应的 L_1。

令 $U = L_2^2/L^2$, $V = L_1^2/L^2$，将根式项移项并平方，整理后化简，得到关于 V 的二次方程，如下所示

$$A(U)V^2 + B(U)V + C(U) = 0. \tag{11}$$

其中 $A(U) = 16 + 72U + 81U^2$, $B(U) = -224U + 72U^2$，且 $C(U) = 16U^2$。通过应用二次公式，可求得 L_2 的值。因此，最终表达式如式（12）所示:

$$L_2 = L\sqrt{\frac{112L_1^2L^2 - 36L_1^4 + 32L_1^2L\sqrt{12L^2 - 9L_1^2}}{16L^4 + 72L_1^2L^2 + 81L_1^4}}. \tag{12}$$

因此，给定 L_1的值后，可由式（12）唯一确定 L_2 ，随后可由式（13）唯一求得 L_3 。这样，所提出机构的正向运动学便得以完整建立。

$$L_3 = \sqrt{L^2 - (L_1^2 + L_2^2) + L_1L_2} \tag{13}$$

C. 逆运动学分析

在逆运动学分析中，选择 L_3 作为自变量，推导出 L_1相对于 L_3 的变换关系。根据式（13），可将其重排为关于 L_2的二次形式。

$$L_2^2 - L_1L_2 + (L_1^2 + L_3^2 - L^2) = 0 \tag{14}$$

类似地，可推导出解 L_2：

$$L_2 = \frac{L_1 + \sqrt{4L^2 - 3L_1^2 - 4L_3^2}}{2} \tag{15}$$

结合式（12）和式（15），可得仅取决于 L_1 和 L_3 的约束方程。对于任意给定的 L_1，在区间$L_1 \in (0,\ \sqrt{3}L/3)$和 $L_3 \in (0,\ L)$内，存在唯一对应的 L_3。该函数关系将在第4.1节工作空间分析中给出。因此，所提出机构的逆运动学得以建立。

表II：灵巧手结构参数

参数	值	参数	值
L/mm	120	ω/弧度	$2\pi/3$
L_1/毫米	(0，70)	β/弧度	(0，π)
L_2/毫米	(0，140)	γ/弧度	($2\pi/3$，π)
L_3/毫米	(0，120)	–	–

IV. 灵巧手的性能分析

性能分析有助于机械系统的设计与优化。利用已建立的运动学模型和约束，从工作空间、运动/力传递、稳定性和刚度等方面评估灵巧手，以确保其在实际应用中的精度和可靠性。

A. 工作空间分析

工作空间表征机构的可达位置，并反映其输入–输出能力。对于灵巧手，在运动约束和连杆参数条件下求解逆运动学，以获得可行输入并确定可达工作空间。结构参数列于表II。

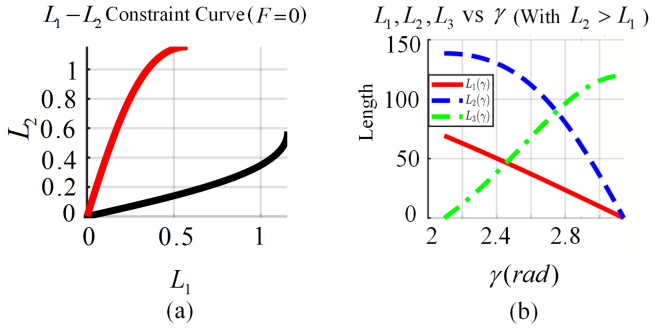


图 7: （a） L_1 和 L_2 （b） L_1、 L_2 和 L_3 相对于 γ。

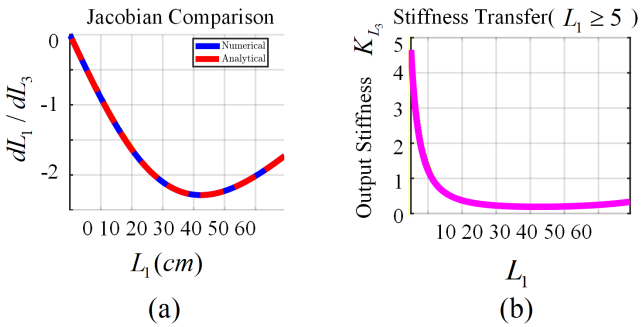


图 8: (a) 雅可比矩阵对比 (b) K_{L_3} 与 L_1的关系。

考虑到灵巧手的应用场景，为避免运动过程中发生机械干涉，施加以下约束： $L_1 \in (0,\sqrt{3}L/3)$、$L_2 \in (0, 2\sqrt{3}L/3)$ 和 $L_3 \in (0, L)$。随后确定正解和逆解的可达工作空间，以及 L_1、 L_2 和L_3 相对于 γ的变化趋势，如图 7(b) 所示。

B. 雅可比分析

雅可比矩阵将关节速度映射为末端执行器速度，从而能够分析运动传递、力分布、奇异点和灵巧性。对于灵巧手，通过对运动学约束关于自变量求导，可得到 J:

$$\dot{p} = J(q)\dot{q} \tag{16}$$

其中， $p \in \mathbb{R}^m$ 表示末端执行器的笛卡尔位置（或同时参数化位置和方向的向量）， $q \in \mathbb{R}^n$ 表示驱动关节变量。向量 $\dot{p}$ 和 $\dot{q}$ 分别表示末端执行器速度和关节速度。由公式（10）和（13）可得到输入变量 L_1 与输出变量 L_3 之间的关系。因此，所提出机构的雅可比矩阵可表示为:

$$\begin{cases} J = \dfrac{-2L_1 + L_2}{2L_3} - \dfrac{-2L_2 + L_1}{2L_3}\dfrac{N_1}{D_1}, \\ N_1 = 90L_1L_2^2 - 24L^2L_1 + 48L^2L_2S_1S_2 \\ \qquad - 36L_1^2L_2\dfrac{S_2}{S_1}, \\ D_1 = 90L_2L_1^2 - 24L^2L_2 + 48L^2L_1S_1S_2 \\ \qquad - 36L_2^2L_1\dfrac{S_1}{S_2}, \\ S_1 = \sqrt{1 - \dfrac{3L_1^2}{4L^2}}, \\ S_2 = \sqrt{1 - \dfrac{3L_2^2}{4L^2}}. \end{cases} \tag{17}$$

基于式(10)中的几何关系，可以对雅可比矩阵进行数值计算。此外，由式(17)推导得到的雅可比矩阵解析表达式使其分布得以可视化。相应结果如图8(a)所示。

C. 稳定性与刚度分析

刚度反映系统抵抗外部扰动的能力，直接影响稳定性和精度。高刚度可减小变形，而低刚度或负刚度可能导致屈曲或振荡。所提出的手掌机构在重构过程中作为单自由度系统运行。对于单自由度重构运动，雅可比矩阵 J 是一个标量，由 $J = dL_3/dL_1$给出。给定输入刚度 K_{L_1}，通过刚度传递关系可得输出刚度K_{L_3} :

$$K_{L_3} = \frac{K_{L_1}}{J^2} \tag{18}$$

刚度描述输出位移相对于输入经由雅可比矩阵放大或衰减的程度。雅可比矩阵较小时，刚度较高，即呈现刚性响应；雅可比矩阵较大时，刚度降低，即呈现柔顺响应。因此，正刚度可确保稳定性，而接近零或负刚度则可能导致失稳。K_{L_3} 随 L_1 的变化如图 8(b)所示。该灵巧手在整个工作空间内均表现出正刚度，表明其具有稳定的运动学行为和有效抵抗外部扰动的能力。

D. 运动/力传递分析

对于非冗余操作器，局部传递指数（LTI） [24] 可用作运动/力传递的性能指标，其定义如下:

$$\kappa = \min\{\zeta_i, \sigma_i\}\,(i = 1, 2, \ldots, n) \tag{19}$$

其中， κ表示局部传递指标， ζ_i 表示支链 i的输入传递效率，而 σ_i表示支链 i的输出传递效率。这两个值的范围均为(0，1)，分别表示从执行器到支链以及从支链到末端执行器的能量传递效率。值越接近 1，表明传递性能越好。这些指标的正式定义如下:

$$\begin{cases} \zeta_i = |\mathbf{S}_{T_i} \circ \mathbf{S}_{I_i}| \,/\, |\mathbf{S}_{T_i} \circ \mathbf{S}_{I_i}|_{\max} \\ \sigma_i = |\mathbf{S}_{T_i} \circ \mathbf{S}_{O_i}| \,/\, |\mathbf{S}_{T_i} \circ \mathbf{S}_{O_i}|_{\max} \end{cases} \tag{20}$$

在公式 (16) 中，$\mathbf{S}_{T_i}$ 表示支链 i的传递力旋量 (TWS)，$\mathbf{S}_{I_i}$ 表示输入扭量 (ITS)，而$\mathbf{S}_{O_i}$ 表示输出扭量 (OTS)。传递力旋量的定义满足：它与该支链中所有被动关节的互易积均为零，从而确保其符合运动学约束。分母最大值的计算可参考 [25]。在参考坐标系 $\{O_m\}$：$O_m - x_m y_m z_m$中，点 M_i 和 N_i 的坐标可明确表示。根据这些坐标，可求得每个连杆转动关节对应的向量。通过计算这些向量的叉积，可确定运动旋量 s_i、$i = M_1,\ M_2,\ M_3,\ N_1,\ N_2,\ N_3$ 的单位向量。因此，三重对称布里卡德机构的运动旋量系可表示为：

$$S_i = [s_i \quad s_{0i}]^T = [s_i \quad r_i \times s_i]^T \tag{21}$$

最后，三重对称布里卡德机构的运动螺旋系可表示为：

最后，三重对称布里卡德机构的运动螺旋系可表示为：

$$\begin{pmatrix} S_{M_1} \\ S_{M_2} \\ S_{M_3} \\ S_{N_1} \\ S_{N_2} \\ S_{N_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}L_2L_3}{m_1} & 0 & m_3 & 0 & -2m_5 & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}L_2L_3}{2m_1} & \frac{3L_2L_3}{2m_1} & m_3 & \sqrt{3}m_5 & m_5 & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}L_2L_3}{2m_1} & -\frac{3L_2L_3}{2m_1} & m_3 & -\sqrt{3}m_5 & m_5 & 0 \\ \frac{\sqrt{3}L_1L_3}{m_2} & 0 & m_4 & 0 & -2m_6 & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}L_1L_3}{2m_2} & \frac{3L_1L_3}{2m_2} & m_4 & \sqrt{3}m_6 & m_6 & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}L_1L_3}{2m_2} & -\frac{3L_1L_3}{2m_2} & m_4 & -\sqrt{3}m_6 & m_6 & 0 \end{pmatrix} \tag{22}$$

其中，m_1-m_6 是 L_1、L_2 和 L_3的函数，其显式表达式如下：

$$\begin{cases} m_1 = \sqrt{3L_1^2L_2^2 + 3L_2^2L_3^2 - 3LL_2^3 + 3L_2^4/4} \\ m_2 = \sqrt{3L_1^2L_2^2 + 3L_1^2L_3^2 - 3L_1^3L_2 + 3L_1^4/4} \\ m_3 = \sqrt{3}L_1L_2/m_1 - \sqrt{3}L_2^2/(2m_1) \\ m_4 = \sqrt{3}L_1L_2/m_2 - \sqrt{3}L_1^2/(2m_2) \\ m_5 = L_1m_3/2 \\ m_6 = -L_2m_4/2 - \sqrt{3}L_1L_3^2/(2m_2) \end{cases} \tag{23}$$

通过分析发现，布里卡德机构由六条运动支链组成。由于其具有三重对称性，只需分析两条代表性支链。为方便起见，选取支链 M_1N_2 和 M_1N_3，其中输入扭量与 x_m轴对齐，输出扭量与 z_m轴对齐，对应的线速度旋量为 $S_i = (L_1\ 0\ 0; 0\ 0\ 0), S_o = (0\ 0\ L_3; 0\ 0\ 0)$。由于支链 M_1N_2 和 M_1N_3关于 $x_mO_mz_m$平面对称，因此只需对支链 M_1N_2 进行传递分析。在该支链中，S_{M_1} 表示驱动关节旋量，S_{N_2}表示被动关节旋量，据此可推导出传递力旋量（TWS） S_{T_i}。最后，绘制了 ζ_i、σ_i和 κ 相对于参数 L_1 的变化曲线，如图 9 所示。

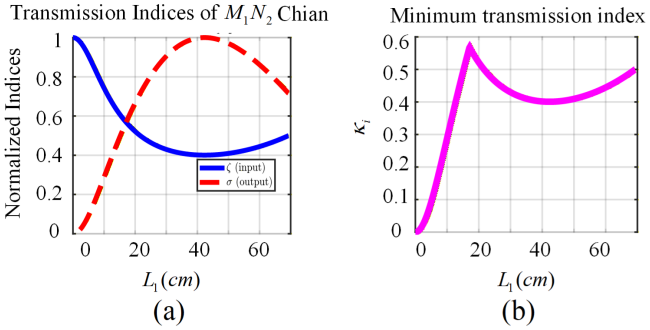


图9：ζ_i、σ_i、κ和 L_1之间的关系。

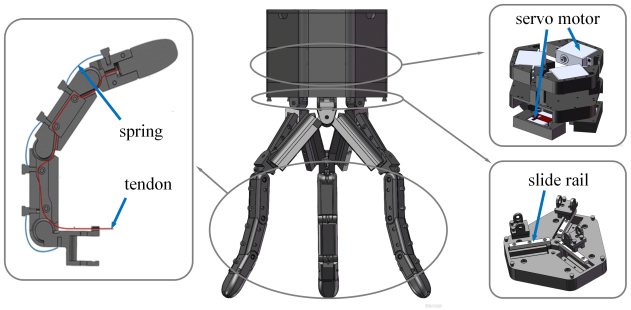


图10：灵巧手模型结构概览。

V. 模型构建与实验

基于前述设计与分析，本节通过原型详细介绍灵巧手实验。本文阐述了通用并联灵巧手的原型制作过程与实验验证，并系统评估了其实际性能。

A. 灵巧手模型设计

该灵巧手采用欠驱动腱绳驱动机构。每根手指由三个部分组成——指尖、中节指骨和基座，它们通过轴承支承的转动关节连接。手指通过腱绳驱动实现屈曲，关节内嵌的扭转弹簧则提供被动恢复力。手指组件通过机械连接件安装在布里卡德手掌上，其运动受到布里卡德连杆机构的约束。

为减少手掌运动过程中的摩擦，布里卡德手掌通过低摩擦直线导轨与基座连接。手部结构采用高碳钢制造，所有部件均经过喷砂和氧化处理，以提高强度和耐磨性。

该手由缆绳驱动传动系统驱动，动力来自六个独立的Feelech伺服电机，每个电机驱动一根缆绳以避免运动耦合。三个电机驱动手指，其余三个控制手掌的张开与闭合。所有伺服电机均由带有URT-1接口的Arduino Nano控制。嵌入指尖的薄膜压力传感器（RP-C7.6-ST）在抓取过程中提供实时接触力反馈。抓取测试验证了夹持器抓取物体的能力，并凸显了其可重构性如何扩展可抓取物品的范围。

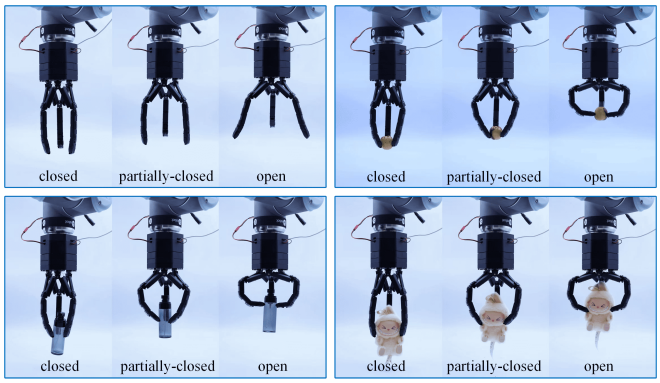


图11：不同手掌位置下的抓取对比。

表 III：抓取结果

物体	闭合	部分闭合	Open
160毫米	0/3	0/3	3/3
120mm	0/3	3/3	3/3
80mm	0/3	3/3	3/3
40mm	3/3	3/3	3/3
鼠标	0/3	3/3	3/3
盘子	0/3	0/3	3/3
圆柱体	3/3	3/3	3/3
毛绒玩具	3/3	3/3	3/3
把手	0/3	3/3	3/3
香蕉	3/3	3/3	3/3
苹果	1/3	3/3	1/3
枣	3/3	3/3	3/3
橙色	3/3	3/3	3/3
小瓶	3/3	3/3	3/3
中瓶	3/3	3/3	3/3
大瓶	3/3	1/3	1/3

布里卡德手掌通过调节连杆之间的夹紧角实现不同构型。在收回模式下，末端执行器尺寸被最小化，以便在狭窄空间中抓取小型物体。半收回模式适用于中等尺寸物体，而完全伸展手掌则提供更大的工作空间，用于对更广泛种类的物体进行闭合抓握操作。抓取性能如图12所示。



Fig. 12：用于评估夹持器操作的物体过程。

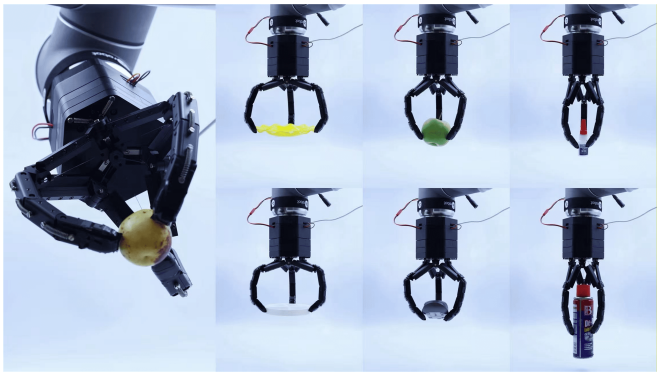


图13：实验过程中的抓取结果。

B. 实验与抓取结果

为评估手指结构对不同形状、尺寸和重量物体的抓取效率，设计了一系列标准化抓取任务。这些任务验证了夹持器的抓取能力，测试物体的尺寸范围为17毫米至180毫米 [26]。所选取的抓取测试物体如图11所示。图13展示了实验过程中部分抓取结果。首先，机械手移动到正确的抓取位置，手指闭合以抓取物体。随后将夹持器抬高30厘米，并保持该位置3秒。接着，控制夹持器沿 x轴移动，然后降低夹持器以放下物体。如果物体在整个抓取过程中始终处于未脱落状态，则认为抓取成功 [27]。

为确保抓取鲁棒性，对每个物体进行了三次抓取实验。表 III 记录了抓取不同手掌状态下各种物体的结果。表中的数字表示成功抓取的次数。

从抓取结果可以看出，灵巧手在完全伸展状态下的抓取性能最佳，但抓取小而重的物体时效率较低。收缩状态下，灵巧手抓取小体积物体和圆柱形物体的表现更佳。半收缩状态在处理重量较大的中小体积物体时具有明显优势。

此外，灵巧手不仅可以水平抓取物体，还能在空间中操控物体。图13展示了实验过程中获得的一些抓取结果。

集成末端执行器压力传感器后，可根据压力读数为

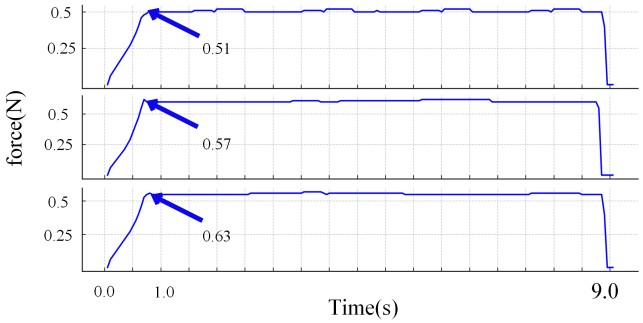


图1 4：捕获效应的压力传感器数据。

不同抓取任务选择最合适的夹持器配置。图14展示了使用手指执行整个枣椰树抓取任务期间记录的压力传感器数据。从上到下，手掌位置依次为完全闭合、部分闭合和完全张开。显然，在抓取过程中，手掌完全闭合时的压力传感器读数最低，表明此时能耗最低。这一初步发现表明，对于小物体抓取任务，手掌完全闭合是最佳选择。

VI. 结论

本研究提出、设计并验证了一种基于三重对称布里卡德机构的新型可重构灵巧手。集成可重构并联手掌结构显著增强了灵巧手的适应性和工作空间，使其能够适应种类更丰富的物体几何形状。全面的运动学和性能分析验证了其运动特性、力传递效率和结构稳定性。实验结果进一步证明，该原型在各种构型下均能有效实现可靠抓握。未来工作将重点优化执行器集成、改进实时控制策略，并将设计扩展至多指构型，以应对更复杂的操作任务。

参考文献

[1] D.-H. Lee、J.-H. Park、S.-W. Park、M.-H. Baeg 和 J.-H. Bae，《Kitech 手：一种高度灵巧且模块化的机器人手》，*IEEE/ASME*机电一体化汇刊，第 22 卷，第 2 期，第 876–887 页，2016 年。[2] J. Martin 和 M. Grossard，《全模块化且可反向驱动的灵巧手设计》，《国际机器人研究杂志》，第 33 卷，第 5 期，第 783–798 页，2014 年。[3] A. M. Dollar 和 R. D. Howe，《高度自适应的 SDM 手：设计与性能评估》，《国际机器人研究杂志》，第 29 卷，第 5 期，第 585–597 页，2010 年。[4] R. R. Ma 和 A. M. Dollar，《用于手内操作的欠驱动平面机械臂的基于连杆的分析与优化》，《机构与机器人学杂志》，第 6 卷，第 1 期，文章编号 011002，2014 年。[5] B. Belzile 和 L. Birglen，《用于本体感觉触觉传感的自适应手指优化设计》，《机构与机器人学杂志》，第 9 卷，第 5 期，文章编号 051004，2017 年。[6] W. Chen 和 C. Xiong，《欠驱动仿人手的自适应抓握》，《仿生工程学杂志》，第 13 卷，第 1 期，第 59–72 页，2016 年。[7] L. Wang、J. W. Zhang 和 D. Zhang，《可重构并联机构综述：设计、分析与挑战》，《工程学》，2024 年，2024 年 10 月 22 日在线发表。

[8] J.-J. Lee 和 L.-W. Tsai，《多指手的结构综合》，机械设计学报，第 124 卷，2002 年，第 276 页。[9] J. Borr`as 和 A. M. Dollar，《面向最大精密操作工作空间的三指机器人手尺寸综合》，《国际机器人研究杂志》，第 34 卷，第 14 期，第 1731–1746 页，2015 年。[10] R. R. Ma、N. Rojas 和 A. M. Dollar，《球形手：实现不受物体尺寸和抓取位置影响的欠驱动手内操作》，《机构与机器人学杂志》，第 8 卷，第 6 期，文章编号 061021，2016 年。[11] J. Borr`as 和 A. M. Dollar，《基于并联机器人框架分析灵巧手》，《自主机器人》，第 36 卷，2014 年，第 169–180 页。[12] J. S. Dai、W. Delun 和 L. Cui，《变构多指手——变构手的姿态与工作空间分析》，IEEE机器人与自动化汇刊，第 25 卷，第 4 期，第 942–947 页，2009 年。[13] X. Jin、Y. Fang、D. Zhang 和 H. Zhang，《并联机构启发的多模态灵巧手的综合：3-[p][s] 并联手指结构》，机械设计学报，第 142 卷，文章编号 083301，2020 年。[14] C. Tian 和 D. Zhang，《新型运动学冗余可重构广义并联操纵器的设计与分析》，机构与机器理论，第 166 卷，文章编号 104481，2021 年。[15] P. Capsi Morales、G. Grioli、C. Piazza、A. Bicchi 和 M. G. Catalano，《探究手掌凹度与适应性在柔性协同机器人手中的作用》，IEEE机器人与自动化快报，第 1–1 页，2020 年。[16] Q. Lu、N. Baron、A. B. Clark 和 N. Rojas，《通过可重构欠驱动实现系统化、物体不变的手内操作：Ruth 夹爪介绍》，《国际机器人研究杂志》，第 40 卷，第 12–14 期，第 1402–1418 页，2021 年。[17] W. An、J. Wei、X. Lu、J. S. Dai 和 Y. Li，《一种具有最大工作空间的新型变构多指手的基于几何设计的尺寸综合》，《中国机械工程》，第 34 卷，第 1 期，2021 年。[18] Z. Huang、J. Liu 和 Y. Li，《机构自由度》。北京：科学出版社，2011 年。[19] K. H. Hunt，《机构运动几何学》，1978 年（无标题）。[20] C. Tian、Y. Fang 和 Q. J. Ge，《一种用于 3T1R运动的部分解耦广义并联机构的设计与分析》，机构与机器理论，第 140 卷，第 211–232 页，2019 年。[21] ——，《具有耦合子链的并联操纵器结构综合》，机构与机器理论，第 118 卷，第 84–99 页，2017 年。[22] Z. Xia、D. Zhang、Y. Chen、C. Tian、J. Liu 和 C. Wu，《一种基于仿人腿的新型六自由度广义并联操纵器的设计与分析》，机构与机器理论，第 176 卷，文章编号 105029，2022 年。[23] Y. Chen、Z. You 和 T. Tarnai，《用于可展开结构的三重对称布里卡德连杆机构》，《国际固体与结构杂志》，第 42 卷，第 8 期，第 2287–2301 页，2005 年。[24] L. Li 、 C. Tian 、 Z. Xia 和 D. Zhang，《考虑运动/力传递性的远程中心运动特性广义单环并联操纵器的优化设计》，《Robotica》，第 1–17 页，2025 年。[25] T. Zhang、Y. Cao 和 G. Ma，《评估并联机构力传递与约束性能的指标》，《机械工程学报》，第 68 卷，第 6 期，第 411–423 页，2022 年。[26] B. Ward-Cherrier、N. Rojas 和 N. F. Lepora，《采用 3D打印触觉夹爪进行无模型精确手内操作》，IEEE机器人与自动化快报，第 2 卷，第 4 期，第 2056–2063 页，2017 年。[27] J. Wang、Q. Lu、A. B. Clark 和 N. Rojas，《用于带动态腱绳布线的欠驱动灵巧夹爪的被动顺应惰轮机构》，载于《迈向自主机器人系统》（TAROS 2020），2020 年。