

# Một phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu kết cấu robot song song dạng treo kích thước lớn, truyền động bằng dây cáp

## *A multi-objective optimization method in designing large-dimension suspended cable-driven parallel robots*

Nguyễn Đình Quân

Bộ môn Robot Đặc Biệt & Cơ Điện Tử,

Khoa Hàng Không Vũ Trụ, Trường ĐH kỹ thuật Lê Quý Đôn

e-Mail: [ndquanvn85@gmail.com](mailto:ndquanvn85@gmail.com)

### Tóm tắt

Bài báo này bàn về một phương pháp tính toán kết cấu của loại robot song song dạng treo có kích thước lớn truyền động bằng dây cáp. Tham số của robot được tính toán nhờ giải quyết một bài toán thiết kế tối ưu hai mục tiêu. Tiêu chuẩn đánh giá đầu tiên sử dụng tổng sức căng trong các dây cáp của robot, cho ước lượng về sức tiêu tốn năng lượng vận hành. Tiêu chuẩn đánh giá thứ hai là chặn trên chuẩn hóa của biên độ lắc của phần công tác, cho ước lượng về độ cứng vững của robot. Một quy trình có tính hệ thống được đề xuất để tìm kiếm các tham số thiết kế tối ưu của robot, có tính toán đến độ thỏa hiệp giữa hai tiêu chuẩn đánh giá khác nhau một cách hiệu quả và được minh họa qua một ví dụ ứng dụng loại robot này trong sản xuất nông nghiệp.

**Từ khóa:** Robot song song truyền động bằng dây cáp, Tối ưu đa mục tiêu

**Abstract:** This paper discusses a method to compute the design parameters of a large-dimension suspended cable-driven parallel robot (CDPR). The deciding parameters are calculated by solving a multi-objective optimal design problem with two performance indices. The first criterion is the sum of the cable tensions which is directly related to the power consumption of the CDPR. The second criterion is the normalized upper bound on the infinitesimal displacement of the mobile platform which represents the stiffness of the CDPR. A systematic procedure is proposed to find optimal design parameters of the CDPR while dealing efficiently with the tradeoff between these two criteria, and is illustrated by an example of using CDPR in agriculture.

**Keywords:** Cable-Driven Parallel Robot, Multi-objective optimization

### Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$A_i$		Điểm ra của dây cáp thứ $i$
$B_i$		Điểm nối dây cáp thứ $i$ với phần công tác
$L_{0i}$	m	Độ dài tự nhiên của dây cáp thứ $i$ (đoạn $A_i B_i$ )

$A_0$	$m^2$	Diện tích mặt cắt ngang của dây cáp
$w$	N/m	Trọng lượng riêng của dây cáp trên 1m chiều dài
$E$	Pa	Mô đun đàn hồi của dây
$\mathbf{K}$		Ma trận độ cứng vững
$\mathbf{K}_H$		Ma trận độ cứng vững thuần nhất
$F_{A_i}, F_{B_i}$		Lực tại điểm ra của dây cáp $A_i$ và tại điểm nối với phần công tác $B_i$
$\tau_{bi}$	N	Sức căng của dây cáp $i$ tại điểm nối $B_i$
$\boldsymbol{\tau}_b$		Vector sức căng tại các điểm nối $B_i$
$f_\Sigma$	N	Tiêu chuẩn tổng sức căng của các dây cáp
$\sigma_M$		Tiêu chuẩn chặn trên chuẩn hóa của biên độ lắc của phần công tác
$r_i$	m	Tham số thiết kế
$dX$		Gia số vi phân của vị trí và định hướng của phần công tác
$dX_H$		Gia số vi phân thuần nhất của vị trí và định hướng của phần công tác
$d\mathbf{f}_e$		Gia số vi phân của lực và mô men của phần công tác
$d\mathbf{f}_{eH}$		Gia số vi phân thuần nhất của lực và mô men của phần công tác
$L_c$	m	Độ dài riêng (dùng để biến đổi ma trận $\mathbf{K}$ sang ma trận thuần nhất $\mathbf{K}_H$ )

### Chữ viết tắt

CDPR	Cable-Driven Parallel Robot (Robot song song truyền động bằng dây cáp)
WFV	Wrench Feasible Workspace (Không gian công tác khả thi về cơ lực và mô men của robot)

## 1. Phần mở đầu

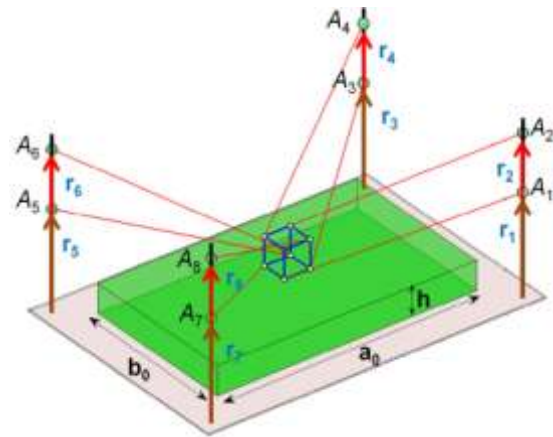
### 1.1 Giới thiệu chung về loại robot song song truyền động bằng dây cáp

Robot song song truyền động bằng dây cáp hiện đang là một lĩnh vực nghiên cứu gây chú ý trong vòng hai thập kỷ trở lại đây. Chúng có nhiều lợi thế như nhẹ nhàng, thiết kế đơn giản, dễ dàng lắp đặt và có tỉ lệ khối lượng tải trọng đảm nhiệm được trên khối lượng robot cao. So với những robot song song truyền thống sử dụng các thanh liên kết rắn, CDPR sử dụng các dây cáp để định vị phần công tác nhờ trực tiếp thay đổi độ dài của mỗi dây cáp, và nhờ vậy có thể hoạt động trên những không gian làm việc lớn. Mặc dù vậy, việc sử dụng dây cáp cũng có một số hạn chế. Trước tiên, các dây cáp chỉ có thể truyền dẫn lực căng gây ra tác động kéo lên phần công tác. Bởi vậy, các dây cáp nối với phần công tác phải luôn luôn ở trong trạng thái bị kéo dãn, nghĩa là lực căng trong mỗi dây cáp phải nằm trong một khoảng dương nhất định. Mặt khác đặc tính phi tuyến của dây cáp (độ đàn hồi, khối lượng dây) làm tăng tính phức tạp của những bài toán mô hình hóa robot. Hơn nữa, do sử dụng dây cáp làm khâu truyền động, độ cứng vững của robot tại phần công tác có thể nhỏ hơn nhiều lần so với những robot song song có các liên kết rắn.

Hầu hết những nghiên cứu trong quá khứ tập trung vào loại CDPR có các vị trí của các điểm nút ra của dây cáp được giữ cố định trong hệ tọa độ toàn cục. Trong đó một vài nghiên cứu về loại CDPR có kích thước lớn có thể kể đến như [1]-[14]. Một số mẫu robot tiêu biểu có thể đảm nhiệm tải trọng lớn như NIST RoboCrane [1], loại robot song song có kích thước lớn thuộc dự án FAST [10]-[12], robot Marionet Crane [14] và CoGiRo [13], [14].

Một vài nghiên cứu gần đây [15]-[18] bàn tới loại CDPR có khả năng tự kết cấu lại nhờ thay đổi vị trí của các điểm nút ra của dây cáp hoặc thay đổi trật tự nối dây cáp với phần công tác. Cách thiết kế với cấu trúc như vậy giúp tăng cường khả năng của robot, nhưng đồng thời cũng làm tăng độ phức tạp của hệ thống. Bài toán tìm kiếm các bộ tham số thiết kế để đạt được một cấu hình tối ưu cho những loại robot này được xem như một bài toán tối ưu có các điều kiện biên phi tuyến. Xiaobo Zhou trong [18] đề xuất một quy trình thiết kế có tính hệ thống tìm kiếm bộ tham số thiết kế tối ưu cho CDPR nhờ giải tối ưu một tiêu chuẩn nhất định (tỉ số giữa giá trị nhỏ nhất và lớn nhất của lực căng trong các dây cáp khi phần công tác di chuyển theo một quỹ đạo nhất định). Tuy nhiên, Phương pháp này chỉ mới được áp dụng trên loại robot có cấu hình phẳng (trong không gian hai chiều). Những vấn đề quan trọng khác như tính liên tục của hàm mục tiêu và các điều kiện biên phi tuyến chưa được xét đến cụ thể.

Nghiên cứu [16] đề xuất một phương pháp giải bài toán tìm cấu hình tối ưu cho loại CDPR có 6 bậc tự do có tính đến các điều kiện liên tục, rời rạc của hàm mục tiêu cũng như các điều kiện biên phi tuyến của bài toán. Bộ tham số thiết kế kết cấu tối ưu được tìm kiếm nhờ cực tiểu hóa năng lượng tiêu thụ của robot.



**H. 1** Sử dụng robot song song truyền động bằng 8 dây cáp có kích thước lớn trong sản xuất nông nghiệp

Tuy nhiên giải pháp này vẫn còn có những hạn chế nhất định. Nghiên cứu [17] chỉ ra một số mặt hạn chế khi chỉ xem xét bài toán thiết kế (hoặc cấu hình lại) robot song song truyền động bằng dây cáp như một bài toán tối ưu một hàm mục tiêu. Một ứng dụng của loại CDPR có kích thước lớn dạng treo (có khả năng cấu hình lại) được đề xuất để thay thế phương pháp truyền thống trong việc bảo dưỡng máy bay tại các phân xưởng. Trong đó, cấu hình tối ưu của robot được tìm kiếm nhờ giải quyết một bài toán tối ưu đa mục tiêu có các điều kiện biên phi tuyến. Hai tiêu chí đánh giá đã được sử dụng. Một là cực tiểu hóa năng lượng tiêu hao nhờ tìm giá trị nhỏ nhất của tổng các sức căng của các dây cáp. Hai là tìm giá trị cực đại của độ cứng vững của robot tại phần công tác. Phương pháp này cho thấy sự ảnh hưởng qua lại giữa hai tiêu chí đánh giá khác nhau và đưa ra được những giải pháp có độ tin cậy cao hơn so với [16], phù hợp với từng yêu cầu cụ thể của người sử dụng.

### 1.2 Bài toán ứng dụng CDPR trong sản xuất nông nghiệp

Cấu trúc của loại robot được nghiên cứu trong bài báo này (Hình 1) có dạng treo giống với cấu trúc của CoGiRo [13] và ReelAx8 [24]. Ưu điểm của cấu trúc dạng treo (tất cả các đầu ra của dây cáp hay các ròng rọc có vị trí nằm bên trên của phần công tác) là có thể đảm nhiệm tải trọng lớn đồng thời có thể tích vùng hoạt động (WFW [25]) rộng. Việc sử dụng 8 dây cáp để di chuyển bộ phận công tác, cho phép phần công tác hoạt động với 6 bậc tự do và tăng thể tích của không gian hoạt động so với các loại robot truyền động với số lượng dây cáp ít hơn [23].

Vị trí của các điểm nút ra của dây cáp  $A_i$  có thể được thay đổi dọc theo bốn cột trụ chính. Theo cấu trúc này thì robot sẽ có tối đa 8 tham số thiết kế là vị trí đầu ra của 8 dây cáp (hay vị trí của 8 ròng rọc dẫn hướng).

**Yêu cầu của bài toán:** Tìm kiếm bộ tham số tối ưu quyết định cấu hình của robot (vị trí của các điểm nút ra  $A_i$ ) sao cho tối ưu hóa một số tiêu chí đánh giá chất lượng hoạt động của robot. Phần công tác cần đảm bảo di chuyển đến được tất cả các vị trí trong một không gian cho trước (vùng đánh dấu màu xanh lá cây). Vùng hoạt động này của robot có diện tích mặt

bằng tương đương với khoảng đất cần canh tác. Phần công tác có thể được lắp đặt thêm dụng cụ canh tác (ví dụ lưỡi cày, máy gặt, máy phun thuốc trừ sâu...).

### 1.3 Đóng góp của bài báo

Đóng góp của bài báo này tập trung vào việc đưa ra giải pháp thiết kế cho một loại CDPR dạng treo có kích thước lớn, được minh họa với một ví dụ ứng dụng loại robot này trong sản xuất nông nghiệp.

Bài toán tìm kiếm bộ tham số thiết kế cho robot được xem như một bài toán tối ưu hai mục tiêu với các điều kiện biên phi tuyến (các điều kiện hạn chế về sức căng trong dây cáp, các điều kiện về va chạm của robot trong không gian công tác và các hạn chế về vị trí và định hướng của phần công tác). Hai tiêu chí sử dụng để đánh giá chất lượng của robot tương tự như trong nghiên cứu [17]. Tiêu chuẩn đánh giá đầu tiên sử dụng tổng sức căng trong các dây cáp của robot, cho ước lượng về mức độ tiêu tốn năng lượng vận hành. Tiêu chuẩn đánh giá thứ hai là chặn trên chuẩn hóa của biên độ lắc của phần công tác, cho ước lượng về độ cứng vững của robot. Hai phương pháp chuẩn hóa các tiêu chí (qui đổi về một hàm mục tiêu) giúp đưa ra những giải pháp thiết kế phù hợp với những yêu cầu khác nhau đặt ra cho robot.

Bài báo được tổ chức như sau. Phần 2 nhắc lại một số công cụ cơ bản phục vụ cho việc phân tích và mô hình hóa các robot song song truyền động bằng dây cáp. Phần 3 bàn đến quy trình giải quyết bài toán tối ưu hai mục tiêu. Ví dụ minh họa cho giải pháp thiết kế của loại robot được giới thiệu trong bài báo này được trình bày trong Phần 4.

## 2. Các công cụ phân tích cơ bản

### 2.1 Mô hình hóa robot

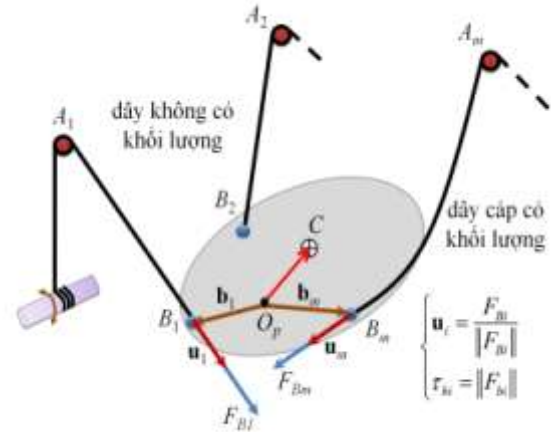
H. 2 mô tả một robot song song truyền động bằng  $m$  dây cáp.  $A_i$  và  $B_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) là các điểm nút ra và các điểm nối của dây cáp  $i$ .  $F_{Bi}$  ( $f_{bix}, f_{biy}, f_{biz}$ ) và  $\tau_{bi}$  là lực và sức căng trong dây cáp  $i$  tại điểm nối  $B_i$  ( $x_{bi}, y_{bi}, z_{bi}$ ). Tất cả các giá trị đều được biểu diễn trong hệ tọa độ toàn cục của robot.

Bài toán mô hình hóa một CDPR thông thường dựa trên một mô hình toán học của dây cáp và một hệ các phương trình cân bằng của phần công tác.

Trong tài liệu [26], Irvine đưa ra mô hình toán giải tích của dây cáp có tính đến độ đàn hồi và khối lượng của dây. Trong [27], một mô hình toán đầy đủ của dây cáp trong không gian ba chiều được đề xuất dưới dạng sau:

$$\begin{aligned} x_{bi} &= f_{1i} L_{0i} f_{bix}, f_{biy}, f_{biz} \\ y_{bi} &= f_{2i} L_{0i} f_{bix}, f_{biy}, f_{biz} \\ z_{bi} &= f_{3i} L_{0i} f_{bix}, f_{biy}, f_{biz} \end{aligned} \quad (1)$$

trong đó  $L_{0i}$  là độ dài tự nhiên của dây cáp thứ  $i$  và  $f_{ji}$  là các hàm phi tuyến [27].



H. 2 Cấu trúc chung của một robot song song truyền động bằng  $m$  dây cáp

Trong trường hợp bài toán động học ngược của robot, cho trước vị trí và định hướng của phần công tác, từ hệ phương trình (1) các tọa độ của điểm nối  $B_i$  được xác định. Ta cần xác định các ẩn số (là độ dài tự nhiên của các dây cáp và các thành phần của lực căng tại điểm nối  $B_i$ ).

Bên cạnh (1), ta cần sử dụng hệ phương trình cân bằng của phần công tác để giải các ẩn số:

$$\mathbf{W}\boldsymbol{\tau}_b + \mathbf{f}_e = \mathbf{0} \quad (2)$$

thỏa mãn các điều kiện:

$$\tau_{\min} \leq \tau_{bi} \leq \tau_{\max} \quad i = 1, \dots, m \quad (3)$$

trong đó:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 & \mathbf{u}_2 & \dots & \mathbf{u}_m \\ \mathbf{Rb}_1 \times \mathbf{u}_1 & \mathbf{Rb}_2 \times \mathbf{u}_2 & \dots & \mathbf{Rb}_m \times \mathbf{u}_m \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\tau}_b = [\tau_{b1} \quad \tau_{b2} \quad \dots \quad \tau_{bm}]^T$$

$$\mathbf{f}_e = [f_x \quad f_y \quad f_z \quad m_x \quad m_y \quad m_z]^T$$

Ở đây,  $\mathbf{W}$  là ma trận cơ lực và mô men,  $\mathbf{f}_e$  là vector lực và mô men gây ra bởi các sợi dây cáp tác động lên phần công tác,  $\mathbf{b}_i$  là vector vị trí của điểm nối  $B_i$  được biểu diễn trong hệ tọa độ gắn với phần công tác với gốc tọa độ là  $O_p$  và  $\mathbf{u}_i$  là vector đơn vị chỉ hướng của lực  $F_{Bi}$ .  $\tau_{\min}$  và  $\tau_{\max}$  là giới hạn dưới và trên của sức căng trong mỗi dây cáp.  $\mathbf{R}$  là ma trận quay thuận nhất, qui chiếu hệ tọa độ toàn cục đến hệ tọa độ gắn với phần công tác  $\langle O_p \rangle$ .

Trong trường hợp bài toán động lực học của robot, chỉ có động lực của phần công tác được tính đến, bỏ qua đặc tính động lực của dây cáp cũng như của hệ thống cuộn dây cáp. Trọng tâm của phần công tác là  $C(x_c, y_c, z_c)$  được biểu diễn trong hệ tọa độ  $\langle O_p \rangle$ .

Giả thiết phần công tác di chuyển với một gia tốc  $\mathbf{a}_p$ , vận tốc góc  $\boldsymbol{\omega}$  và gia tốc góc  $\boldsymbol{\alpha}$ .

Hệ phương trình chuyển động của phần công tác được biểu diễn như sau:

$$\begin{bmatrix} F \\ M_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_p G \\ \mathbf{d} \times m_p G \end{bmatrix} + \mathbf{W}\boldsymbol{\tau}_b = \mathbf{0} \quad (4)$$

trong đó,  $m_p$  là tổng khối lượng của phần công tác.  $G = 0 \quad 0 \quad g^T$  với  $g = 9.81 \text{m/s}^2$  và  $\mathbf{d} = \mathbf{R} \cdot \overrightarrow{O_p C}$  là

qui chiếu của vectơ  $\overline{O_p C}$  trong hệ tọa độ toàn cục.  $F$  và  $M_p$  là lực và mô men quán tính tác động lên phần công tác:

$$F = m_p \left[ \mathbf{a}_p + \boldsymbol{\alpha} \times \mathbf{d} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{d} \right] \quad (5)$$

$$M_p = m_p \mathbf{d} \times \mathbf{a}_p + \mathbf{I}_p \boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}_p \boldsymbol{\omega} \quad (6)$$

trong đó  $\mathbf{I}_p$  là ma trận quán tính xung quanh  $O_p$  của phần công tác, được biểu diễn trong hệ tọa độ toàn cục:

$$\mathbf{I}_p = \mathbf{R} \mathbf{I}_c \mathbf{R}^T + m_p \left[ \mathbf{d}^T \mathbf{d} \cdot \mathbf{1}_{3 \times 3} - \mathbf{d} \mathbf{d}^T \right] \quad (7)$$

$\mathbf{I}_c$  là ma trận quán tính khối đối với trọng tâm  $C$  của phần công tác,  $\mathbf{1}_{3 \times 3}$  là ma trận đơn vị.

### 2.2 Bài toán động học ngược và phân bố lực căng

Các phương trình (2) và (4) được sử dụng để giải bài toán động học ngược và bài toán phân bố lực căng trong dây cáp. Đối với loại CDPR có kích thước lớn đảm nhiệm tải trọng nặng (có thể lên đến trên 1 tấn), các dây cáp bằng thép được sử dụng để đảm bảo hệ số an toàn cao. Các mô hình toán cho dây cáp tính đến độ đàn hồi và khối lượng dây phải được sử dụng. Ta có thể sử dụng mô hình toán giản lược của dây cáp [9], [14] để giải bài toán phân bố lực căng của robot nhờ một số phương pháp hiệu quả như phương pháp trong [23].

Sau khi lực căng trong mỗi dây cáp đã được xác định, độ dài tự nhiên của dây cáp có thể được tính toán nhờ sử dụng phương pháp được đề xuất trong [14].

### 2.3 Ma trận độ cứng vững

Giả sử mỗi một dây cáp của CDPR trong H. 2 có độ dài tự nhiên  $L_{0i}$ , vector vị trí và định hướng của phần công tác là  $X = x \ y \ z \ \theta_x \ \theta_y \ \theta_z$ , vector vị trí  $O_p = x \ y \ z$  của hệ tọa độ gắn với phần công tác, vector định hướng  $\boldsymbol{\theta} = \theta_x \ \theta_y \ \theta_z$  (các góc Euler),  $dO_p = dx \ dy \ dz$  là vector gia số vị trí,  $d\Phi = \mathbf{S} \cdot d\boldsymbol{\theta}$  là vector gia số định hướng với  $d\boldsymbol{\theta} = d\theta_x \ d\theta_y \ d\theta_z$  và  $dX = dO_p, d\Phi$  là gia số vị trí và định hướng của phần công tác. Ký hiệu  $\mathbf{u}_x$  chỉ ma trận nhân có hướng của vectơ  $\mathbf{u}$ . Ma trận quay  $\mathbf{R}$  và ma trận chuyển đổi  $\mathbf{S}$  (chuyển đạo hàm bậc một của vectơ các góc Euler theo trật tự ZYX sang vector vận tốc góc của phần công tác) được tính như sau:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} C_y C_z & C_z S_y S_x - S_z C_x & C_z S_y C_x + S_z S_x \\ C_y S_z & S_z S_y S_x + C_z C_x & S_z S_y C_x - C_z S_x \\ -S_y & C_y S_x & C_y C_x \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} C_y C_z & -S_z & 0 \\ C_y S_z & C_z & 0 \\ -S_y & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

với  $C_x = \cos \theta_x, S_x = \sin \theta_x, C_y = \cos \theta_y, \dots$

Ta có lực và mô men gây ra bởi các dây cáp lên phần công tác:

$$\mathbf{f}_c = \left[ \sum_{i=1}^m -F_{Bi}, \sum_{i=1}^m -\mathbf{R} \mathbf{b}_i \times F_{Bi} \right]^T \quad (8)$$

Giả sử có một gia số vi phân lực và mô men tác động lên phần công tác. Ở trạng thái cân bằng tĩnh ta có:

$$d\mathbf{f}_e = d \quad -\mathbf{f}_c = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m dF_{Bi} \\ \sum_{i=1}^m d \mathbf{R} \mathbf{b}_i \times F_{Bi} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Khai triển (9), ta có được:

$$d\mathbf{f}_e = \mathbf{K} \cdot dX - \mathbf{K}_L \cdot dL_0 \quad (10)$$

trong đó :

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

với

$$\mathbf{K}_{11} = \sum_{i=1}^m \mathbf{K}_{Bi}$$

$$\mathbf{K}_{12} = \sum_{i=1}^m \mathbf{K}_{Bi} \cdot \mathbf{R} \mathbf{b}_i \times$$

$$\mathbf{K}_{21} = \sum_{i=1}^m \mathbf{R} \mathbf{b}_i \times \cdot \mathbf{K}_{Bi}$$

$$\mathbf{K}_{22} = \sum_{i=1}^m F_{Bi}^T \cdot \mathbf{R} \mathbf{b}_i^T$$

$$- \sum_{i=1}^m \mathbf{R} \mathbf{b}_i \times \cdot \mathbf{K}_{Bi} \cdot \mathbf{R} \mathbf{b}_i \times$$

và

$$\mathbf{K}_L = \begin{bmatrix} K_{L1} & \dots & K_{Lm} \\ \mathbf{R} \mathbf{b}_1 \times \cdot K_{L1} & \dots & \mathbf{R} \mathbf{b}_m \times \cdot K_{Lm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

với

$$K_{Li} = \mathbf{K}_{Bi} \cdot F_{Ai} \cdot \left( \frac{1}{EA_0} + \frac{1}{\tau_{ai}} \right) \quad i = 1, \dots, m \quad (13)$$

Trong đó,  $F_{Ai} = [f_{biz} \ f_{biy} \ f_{bix} - wL_{0i}]^T$  là lực gây ra bởi dây cáp  $i$  tại điểm nút ra  $A_i$  (lực này hướng về phía  $B_i$ ).  $\mathbf{K}_{Bi}$  là ma trận độ cứng vững của dây cáp  $i$  tại điểm nối  $B_i$  [27],  $\tau_{ai}$  là lực căng tại điểm nút  $A_i$ .

Nếu trong quá trình tác động của ngoại lực và mô men  $d\mathbf{f}_e$  lên phần công tác, độ dài tự nhiên của các dây cáp được giả thiết là không đổi ( $dL_0 = \mathbf{0}$ ), chúng ta sẽ có được  $\mathbf{K}$  là ma trận độ cứng vững của robot.

### 2.4 Phát hiện va chạm

Đối với robot song song truyền động bằng dây cáp, các va chạm có thể xảy ra trong một vài trường hợp :

- Va chạm giữa dây cáp với dây cáp
- Va chạm giữa dây cáp với phần công tác
- Va chạm giữa phần công tác với các vật xung quanh trong không gian làm việc
- Va chạm giữa dây cáp với các vật xung quanh



Bài toán phát hiện va chạm đóng vai trò quan trọng trong việc tính toán không gian công tác an toàn của robot (đảm bảo không có bất kỳ va chạm nào tác động lên robot, và giữa các bộ phận của CDPR với nhau trong không gian làm việc).

Một số thuật toán phát hiện va chạm hiệu quả có thể tìm thấy ở một số tài liệu như [28]-[30].

### 3. Giải quyết bài toán thiết kế tối ưu

#### 3.1 Các chỉ tiêu đánh giá

##### 3.1.1 Tổng sức căng của các dây cáp

Xét robot song song truyền động với  $m$  dây cáp (H. 2) trong một kết cấu được định nghĩa bởi vector tham số thiết kế  $\mathbf{r}$ . Tại một vị trí cân bằng của phần công tác, nhờ giải quyết bài toán phân bố lực căng, ta nhận được các sức căng tương ứng trong mỗi dây cáp  $\tau_i$ , ( $i = 1, \dots, m$ ). Chúng ta có thể tính toán tổng sức căng của các dây cáp :

$$f_{\Sigma} \mathbf{r} = \sum_{i=1}^m \tau_i \mathbf{r} \quad (14)$$

Để đánh giá tiêu chuẩn này đối với một không gian làm việc cho trước, chúng ta có thể chia nhỏ phần không gian này thành  $N$  điểm rời rạc. Nhìn chung, có thể chọn những điểm ở rìa không gian và một số điểm rời rạc nằm bên trong là đủ. Khi đó, giá trị trung bình của tổng sức căng trong các dây cáp cho một không gian làm việc có thể được tính như sau :

$$f_{\Sigma} \mathbf{r} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m \tau_{ik} \mathbf{r} \quad (15)$$

trong đó,  $\tau_{ik}$  là lực căng của dây cáp  $i$  (tại điểm nổi  $B_i$ ) tại điểm cân bằng rời rạc thứ  $k$  [15], [17].

##### 3.1.2 Chặn trên chuẩn hóa của biên độ lắc của phần công tác

Chỉ tiêu này được giới thiệu trong [17], là một kết quả mở rộng từ nghiên cứu [5].

Giả sử rằng tại một điểm cân bằng, có một ngoại lực  $dF_e$  tác động lên phần công tác tại một điểm  $M$  (xem H. 3). Ngoại lực này tạo ra một gia số vị phân lực và mô men tại  $O_p$ ,  $d\mathbf{f}_e = dF_e$ ,  $\mathbf{r}_M \times dF_e$ ,  $\mathbf{r}_M = \overline{O_p M}$ ,

làm cho phần công tác dịch chuyển một lượng  $dX$ .

Từ quan hệ (9) (với  $dL_0 = \mathbf{0}$ ), ta có thể khai triển :

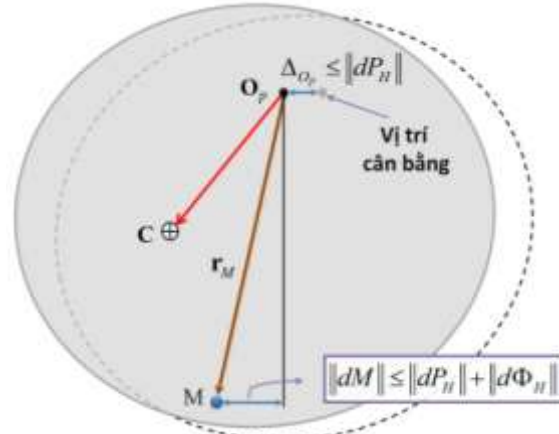
$$\mathbf{K}_H \cdot dX_H = d\mathbf{f}_{eH} \quad (16)$$

trong đó :

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_H &= \mathbf{S}_H^{-1} \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{S}_H^{-1} \\ dX_H &= \mathbf{S}_H \cdot dX \\ d\mathbf{f}_{eH} &= \begin{bmatrix} dF_e \\ \mathbf{u}_M \times dF_e \end{bmatrix}, \mathbf{S}_H = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \|\mathbf{r}_M\| \cdot \mathbf{1}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

và  $\mathbf{u}_M$  là vector đơn vị  $\frac{\mathbf{r}_M}{\|\mathbf{r}_M\|}$ .

Trong phương trình (16), đại lượng  $dX_H$  và  $d\mathbf{f}_{eH}$  là thuần nhất (các đơn vị là met và Newtons, tương ứng). Ma trận  $\mathbf{S}_H$  chuyển đổi ma trận độ cứng vững  $\mathbf{K}$  sang dạng thuần nhất  $\mathbf{K}_H$ . Độ dài riêng được sử dụng trong chuyển đổi này là  $L_c = \|\mathbf{r}_M\|$ .



**H. 3** Gia số vị trí của  $O_p$  và điểm  $M$  trên phần công tác Lựa chọn của  $L_c$  đóng vai trò quan trọng trong việc đưa ra một đánh giá có ý nghĩa cho ma trận độ cứng vững thuần nhất  $\mathbf{K}_H$  (ma trận  $\mathbf{K}$  có thể coi là một ma trận thuần nhất với độ dài riêng  $L_c = 1\text{m}$ ). Ta có thể diễn giải ý nghĩa của vector gia số vị trí và định hướng thuần nhất  $dX_H = dP_H$ ,  $d\Phi_H$  (đại lượng  $dP_H = dO_p$ ,  $d\Phi_H = \|\mathbf{r}_M\| \cdot d\Phi$ ) như sau.

Biến đổi từ tọa độ của điểm tác động  $M$  trong hệ tọa độ toàn cục :

$$\begin{aligned} M &= O_p + M - O_p = O_p + \mathbf{r}_M \\ \Rightarrow \|dM\| &= \|dO_p + d\Phi \times \mathbf{r}_M\| \\ \Rightarrow \|dM\| &\leq \|dO_p\| + \|d\Phi\| \cdot \|\mathbf{r}_M\| \\ &= \|dP_H\| + \|d\Phi_H\| \end{aligned} \quad (17)$$

Biên độ của gia số chuyển vị tại  $O_p$  là  $\|dM\|$ , trong khi đó biên độ gia số chuyển vị tại  $M$  (trong hệ tọa độ gắn với phần công tác) bị giới hạn bởi  $\|d\Phi_H\|$ . Từ phương trình (16), ta có thể tính toán hai đại lượng này :

$$\begin{aligned} dX_H &= \mathbf{K}_H^{-1} \cdot d\mathbf{f}_{eH} \\ \Rightarrow \begin{cases} dP_H = \mathbf{C}_P \cdot d\mathbf{f}_{eH} \\ d\Phi_H = \mathbf{C}_\Phi \cdot d\mathbf{f}_{eH} \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

với  $\mathbf{K}_H^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_P^T & \mathbf{C}_\Phi^T \end{bmatrix}^T$ .

Từ (18), ta có :

$$\begin{aligned} \frac{\|dP_H\|}{\|d\mathbf{f}_{eH}\|} &\leq \|\mathbf{C}_P\| = \sigma_{P_{\max}} \\ \frac{\|d\Phi_H\|}{\|d\mathbf{f}_{eH}\|} &\leq \|\mathbf{C}_\Phi\| = \sigma_{\Phi_{\max}} \\ \Rightarrow \frac{\|dM\|}{\|d\mathbf{f}_{eH}\|} &\leq \sigma_M = \sigma_{P_{\max}} + \sigma_{\Phi_{\max}} \end{aligned} \quad (19)$$

trong đó,  $\sigma_{P_{\max}}$  và  $\sigma_{\Phi_{\max}}$  là các chuẩn Euclide lớn nhất (hay là các giá trị suy biến lớn nhất) của ma trận  $\mathbf{C}_P$  và  $\mathbf{C}_\Phi$  tương ứng.

Đại lượng  $\sigma_M$  là chặn trên chuẩn hóa của biên độ lắc của phần công tác và được sử dụng để đánh giá độ cứng vững của một CDPR tại phần công tác.

Trong bài báo này, quan niệm 'độ cứng vững' của robot được hiểu như sau : bộ tham số thiết kế nào cho gia số  $dM$  với biên độ lắc càng nhỏ (hoặc  $\sigma_M$  càng nhỏ) dưới tác động của bất cứ một ngoại lực nào thì độ cứng vững tại phần công tác của robot càng lớn.

Để đưa ra đánh giá của tiêu chuẩn này cho một không gian làm việc cho trước (đã được chia nhỏ thành  $N$  điểm rời rạc), ta có thể tính giá trị trung bình của các giá trị  $\sigma_{Mk}$   $k=1, \dots, N$  :

$$\sigma_M \mathbf{r} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sigma_{Mk} \mathbf{r} \quad (20)$$

trong đó,  $\sigma_{Mk}$  là chặn trên chuẩn hóa của biên độ lắc của phần công tác tại điểm rời rạc  $k$  trong không gian làm việc.

Bằng cách giải bài toán tối ưu tìm giá trị nhỏ nhất của  $\sigma_M \mathbf{r}$  ta sẽ tìm được giải pháp thiết kế trong đó biên độ gia số chuyển vị của phần công tác tại điểm được quan tâm  $M$  là nhỏ nhất.

### 3.2 Chuẩn hóa hàm mục tiêu

Giả sử rằng,  $f_\Sigma^*$  là giá trị tối ưu tìm được nhờ cực tiểu hóa hàm mục tiêu  $f_\Sigma \mathbf{r}$  trong (14) và  $\sigma_M^*$  là giá trị tối ưu đạt được nhờ cực tiểu hóa hàm mục tiêu  $\sigma_M \mathbf{r}$  trong (20) (chú ý, hai bài toán tối ưu tìm  $f_\Sigma^*$  và  $\sigma_M^*$  là độc lập với nhau).

#### 3.2.1 Sử dụng phương pháp tiêu chuẩn toàn cục

Khi hai tiêu chuẩn đánh giá có cùng mức độ ưu tiên, ta có thể sử dụng phương pháp tiêu chuẩn toàn cục [22] để chuẩn hóa hàm mục tiêu. Bài toán tối ưu ban đầu có thể được biểu diễn lại dưới dạng bài toán tối ưu một mục tiêu truyền thống như sau :

$$\text{minimize } f \mathbf{r} = \left[ 1 - \delta_\Sigma^s + 1 - \delta_M^s \right]^{1/s} \quad (21)$$

thỏa mãn các điều kiện :

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{\min} &\leq \mathbf{r} \leq \mathbf{r}_{\max} \\ \mathbf{r} &\in \mathbf{C}_r \end{aligned}$$

trong đó :

$$\delta_\Sigma = \frac{f_\Sigma \mathbf{r}}{f_\Sigma^*}, \quad \delta_M = \frac{\sigma_M \mathbf{r}}{\sigma_M^*} \quad (22)$$

và  $\mathbf{r}_{\min}$  và  $\mathbf{r}_{\max}$  là chặn dưới và chặn trên của các tham số thiết kế,  $\mathbf{C}_r$  là tập hợp của các bộ tham số thiết kế thỏa mã tất cả các điều kiện biên phi tuyến bao gồm cả các điều kiện hình học và các điều kiện về cơ lực. Tham số  $s$  là một hệ số chuẩn hóa (thông thường ta có thể chọn  $s = 2$ ).

Trong phương pháp này, độ thỏa hiệp giữa các tiêu chuẩn đánh giá được quản lý một cách tự động.

#### 3.2.2 Sử dụng phương pháp giới hạn hàm mục tiêu

Khi hai tiêu chuẩn đánh giá có mức độ ưu tiên khác nhau, ta có thể sử dụng phương pháp giới hạn hàm mục tiêu [22] để chuẩn hóa các tiêu chí đánh giá.

Trong đó, một tiêu chuẩn được lấy làm hàm mục tiêu của bài toán tối ưu, tiêu chuẩn còn lại được chuyển đổi thành một điều kiện biên phi tuyến. Thông thường những tiêu chuẩn có mức ưu tiên cao hơn sẽ được chuyển thành điều kiện biên của bài toán.

Lấy ví dụ, giả sử rằng có một điều kiện chặt đối với mức độ tiêu hao năng lượng của robot. Khi đó, ta có thể chuyển đổi  $f_\Sigma \mathbf{r}$  thành một điều kiện biên và giữ  $\sigma_M \mathbf{r}$  làm hàm mục tiêu. Bài toán thiết kế trong trường hợp này trở thành :

$$\text{minimize } \sigma_M \mathbf{r} \quad (23)$$

thỏa mãn các điều kiện :

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{\min} &\leq \mathbf{r} \leq \mathbf{r}_{\max} \\ \mathbf{r} &\in \mathbf{C}_r \\ \delta_\Sigma \mathbf{r} &\leq \delta \end{aligned}$$

với  $\delta$  là một giá trị cho trước.

Theo cách này, độ thỏa hiệp giữa các tiêu chuẩn đánh giá được quản lý nhờ đại lượng  $\delta$  .

### 3.3 Quy trình giải quyết bài toán thiết kế tối ưu

Quy trình tìm kiếm bộ tham số thiết kế tối ưu được trình bày theo những bước sau đây :

**Bước 1 :** Xác định các yêu cầu hoạt động cần đảm bảo của robot bao gồm không gian làm việc trong hệ tọa độ Đề-Các và trong hệ tọa độ góc quay của phần công tác, và giới hạn của sức căng trong mỗi dây cáp (định nghĩa điều kiện biên phi tuyến  $\mathbf{r} \in \mathbf{C}_r$ ). Xác định giới hạn của các tham số kết cấu của robot (điều kiện biên tuyến tính).

**Bước 2 :** Xác định các tham số thiết kế. Lựa chọn về số lượng các tham số thiết kế phụ thuộc vào yêu cầu và đặc điểm riêng của từng bài toán ứng dụng.

**Bước 3 :** Xác định độ dài riêng  $L_c$  (để chuyển đổi ma trận độ cứng vững sang dạng chuẩn nhất của nó) nhằm tính toán tiêu chuẩn  $\sigma_M$  trong (20).

**Bước 4a :** Tìm giá trị tối ưu  $f_\Sigma^*$  nhờ giải bài toán tối ưu một hàm mục tiêu:

$$\text{minimize } f_\Sigma \mathbf{r} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m \tau_{ik} \mathbf{r} \quad (24)$$

thỏa mãn các điều kiện :

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{\min} &\leq \mathbf{r} \leq \mathbf{r}_{\max} \\ \mathbf{r} &\in \mathbf{C}_r \end{aligned}$$

**Bước 4b :** Tìm giá trị tối ưu  $\sigma_M^*$  nhờ giải bài toán tối ưu một hàm mục tiêu :

$$\text{minimize } \sigma_M \mathbf{r} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sigma_{Mk} \mathbf{r} \quad (25)$$

thỏa mãn các điều kiện :

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{\min} &\leq \mathbf{r} \leq \mathbf{r}_{\max} \\ \mathbf{r} &\in \mathbf{C}_r \end{aligned}$$

**Bước 5a :** Nếu hai tiêu chí có cùng mức ưu tiên, giải bài toán tối ưu (21) để tìm bộ tham số tối ưu cho robot (Pareto optimal solution [19]).

**Bước 5b :** Nếu hai tiêu chí có mức ưu tiên khác nhau, giải bài toán tối ưu (23) để tìm bộ tham số tối ưu cho

robot. Điều kiện biên phi tuyến được chuyển đổi từ một tiêu chí đánh giá (ví dụ,  $\delta_{\Sigma} \mathbf{r} \leq \delta$ ) nên được biểu diễn dưới dạng tỷ lệ tương đối như trong (22). Trong trường hợp  $f_{\Sigma} \mathbf{r}$  được sử dụng làm hàm mục tiêu, bước 4a có thể được bỏ qua. Trong trường hợp  $\sigma_M \mathbf{r}$  được chọn làm hàm mục tiêu, bước 4b có thể được bỏ qua.

Chú ý rằng, các điều kiện phi tuyến  $\mathbf{r} \in \mathbf{C}_r$  có thể được biểu diễn dưới dạng thông thường như sau:

$$g \mathbf{r} = 0.5 - 1.0 * h \mathbf{r} \leq 0 \quad (26)$$

trong đó

$$h \mathbf{r} = \begin{cases} 1, & \text{khi } \mathbf{r} \in \mathbf{C}_r \\ 0, & \text{khi } \mathbf{r} \notin \mathbf{C}_r \end{cases} \quad (27)$$

Ở đây,  $h(\mathbf{r})$  là hàm kiểm chứng tất cả các điều kiện biên phi tuyến.

#### 4. Bài toán ứng dụng

Trong ứng dụng sử dụng CDPR có kích thước lớn vào sản xuất nông nghiệp, ta có thể sử dụng một robot song song truyền động với 8 dây cáp. Quỹ đạo của phần công tác có thể di chuyển đến tất cả các vị trí thuộc khoảng đất cần canh tác. Đối với mỗi tác vụ (làm đất, gieo trồng, tưới tiêu,...) phần công tác có thể được lắp thêm dụng cụ tương ứng.

Trong khuôn khổ của bài báo, phần công tác được giả thiết có hình hộp lập phương kích thước cạnh 1 (m), có tải trọng tương đối lớn ( $m_p$  có giá trị lớn, và lớn hơn nhiều lần so với khối lượng của dụng cụ lắp kèm). Điều này đảm bảo trọng tâm của phần công tác chỉ bị thay đổi một lượng rất nhỏ, không đáng kể khi mang tải (vị trí của  $O_p \equiv C$  và được coi là không thay đổi) đồng thời làm tăng độ cứng vững của phần công tác dưới tác động của trọng lực.

Dây cáp sử dụng có thông số như sau:

$$E = 100e + 09 \text{ Pa}$$

$$A_0 = 1.5975e - 05 \text{ m}^2$$

$$w = 1.2224 \text{ N/m}$$

##### 4.1 Bước 1 : Thiết đặt các yêu cầu của robot

Trong khuôn khổ bài báo này, các yêu cầu làm việc của robot được cho trước như sau:

$$m_p = 300 \text{ kg}$$

$$-20 \leq x \leq 20 \text{ m} \quad (a_0 = 40\text{m})$$

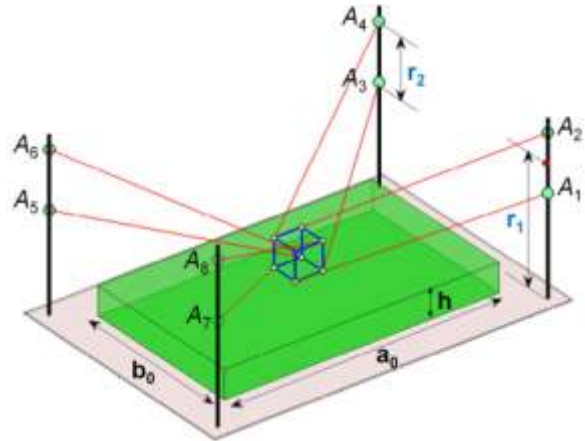
$$-10 \leq y \leq 10 \text{ m} \quad (b_0 = 20\text{m})$$

$$0.5 \leq z \leq 2.5 \text{ m} \quad (h = 2\text{m})$$

$$\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0 \text{ deg}$$

$$100 \leq \tau_{bi} \leq 1.1182e + 04 \text{ N}, \quad i = 1, \dots, 8$$

Không gian làm việc trong hệ tọa độ Đề Các được chia làm  $N = 90$  điểm rời rạc phân bố đều trên bề mặt ngoài.



H. 4 Tham số thiết kế của robot song song truyền động bằng 8 dây cáp.

##### 4.2 Bước 2 : Xác định các tham số thiết kế

Đối với loại CDPR có kết cấu như đã giới thiệu, có tối đa 8 tham số thiết kế ứng với vị trí của 8 điểm nút ra  $A_i$  của các dây cáp. Trong ví dụ này ta chỉ xét đến trường hợp bài toán có 2 tham số thiết kế  $\mathbf{r} = r_1 \ r_2$

với  $r_1$  là khoảng cách từ điểm chính giữa của hai điểm nút ra trên một cọc trụ bất kỳ tới mặt đất, và  $r_2$  là khoảng cách giữa hai điểm nút ra trên cùng một cọc trụ bất kỳ (xem H. 4).

Lưu ý rằng, sau mỗi một vòng tính toán, giá trị của các tham số thiết kế cần được chuẩn hóa:

$$r_i = \min \max r_i, r_{i\min}, r_{i\max} \quad i = 1, 2 \quad (28)$$

Trong đó, các giá trị giới hạn chặn dưới và chặn trên của các tham số thiết kế được cho trước:

$$r_{1\min} = 1, \quad r_{1\max} = 10 \text{ m}$$

$$r_{2\min} = 0.2, \quad r_{2\max} = 3 \text{ m}$$

##### 4.3 Bước 3 : Xác định độ dài tự nhiên $L_c$

Độ dài riêng  $L_c$  trong trường hợp này được chọn là khoảng cách từ trọng tâm của phần công tác tới các

điểm nối  $B_i$ ,  $L_c = \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ m}$ .

Với lựa chọn này, robot với bộ tham số thiết kế cho giá trị nhỏ nhất của tiêu chuẩn  $\sigma_M \mathbf{r}$  sẽ có biên độ lắc tại các điểm nối  $B_i$  của phần công tác được cực tiểu hóa tối đa dưới tác động của một ngoại lực bất kỳ.

##### 4.4 Bước 4 và 5 : Giải bài toán thiết kế tối ưu

Thuật toán tìm kiếm theo mẫu (pattern search algorithm) trong bộ công cụ giải tối ưu toàn cục của MATLAB (global optimization toolbox [21]) được sử dụng để giải các bài toán tối ưu được trình bày trong các bước 4a, 4b, 5a và 5b (mục 3.3). Phương pháp này có thể giải quyết được các bài toán tối ưu có các điều kiện biên tuyến tính, phi tuyến và không yêu cầu các hàm số phải có tính liên tục.

Trong bước 5b,  $\sigma_M \mathbf{r}$  được chọn làm hàm mục tiêu với điều kiện biên phi tuyến bổ sung  $\delta_{\Sigma} \leq \delta = 1.3$ .

Bảng 1 Kết quả nhận được từ việc giải các bài toán tối ưu khác nhau

Các bước	$r_1$ $r_2$ (m)	$f_{\Sigma}$ (N)	$\sigma_M$ (m/N)	$f$	$\delta_{\Sigma}$	$\delta_M$
Bước 4a	10.00 0.3393	8.7254e+03	17.000e-04	6.7338	1.0000	7.7338
Bước 4b	5.25 0.8044	1.9365e+04	2.1773e-04	1.2194	2.2194	1.0000
Bước 5a	6.2728 0.20	1.4980e+04	2.9537e-04	0.8006	1.7168	1.3566
Bước 5b	7.8459 0.20	1.1333e+04	6.6364e-04	2.0697	1.2989	3.0480

Điều này có nghĩa rằng mức độ tiêu hao năng lượng của robot được giới hạn không vượt quá 130% giá trị tối ưu ( $f_{\Sigma} \mathbf{r} \leq 1.3f_{\Sigma}^*$ ).

Trong bước 4a, vector tham số  $\mathbf{r}$  được khởi tạo với giá trị trung bình:

$$\mathbf{r}_{init} = \left( \frac{r_{1min} + r_{1max}}{2} \quad \frac{r_{2min} + r_{2max}}{2} \right) * (1 - 0.02 * rand())$$

trong đó  $rand()$  là hàm khởi tạo giá trị ngẫu nhiên trong khoảng [0 1]. Trong các bước tiếp theo, giá trị khởi tạo  $\mathbf{r}_{init}$  được chọn là giá trị của bộ tham số tìm được sau khi giải bài toán tối ưu trong bước 4a.

H. 5 cho thấy kết quả của bốn bước. Để ý đến một điểm thú vị trong kết quả này. Đó là, trong đáp án của bài toán cực tiểu hóa tiêu chuẩn tổng sức căng của các dây cáp, các điểm nút ra  $A_i$  có xu hướng dịch chuyển đến vị trí làm cho dây cáp  $i$  có độ nghiêng lớn nhất so với mặt đất. Trong khi đó nếu ta cực tiểu hóa tiêu chuẩn chặn trên chuẩn hóa của biên độ lắc của phần công tác, ta nhận được bộ tham số tối ưu mà tại đó các điểm nút  $A_i$  có xu hướng dịch chuyển đến vị trí mà các sợi dây có độ nghiêng nhỏ lại so với mặt đất. Thực tế này nhấn mạnh lý do tại sao lại coi bài toán thiết kế CDPR như một bài toán tối ưu đa mục tiêu.

Chúng ta có thể thấy được độ thỏa hiệp giữa hai tiêu chí đánh giá trong bốn trường hợp qua giá trị của chúng và giá trị của các tỷ lệ tương đối tương ứng (trong (22)). Các kết quả được thể hiện trong Bảng 1

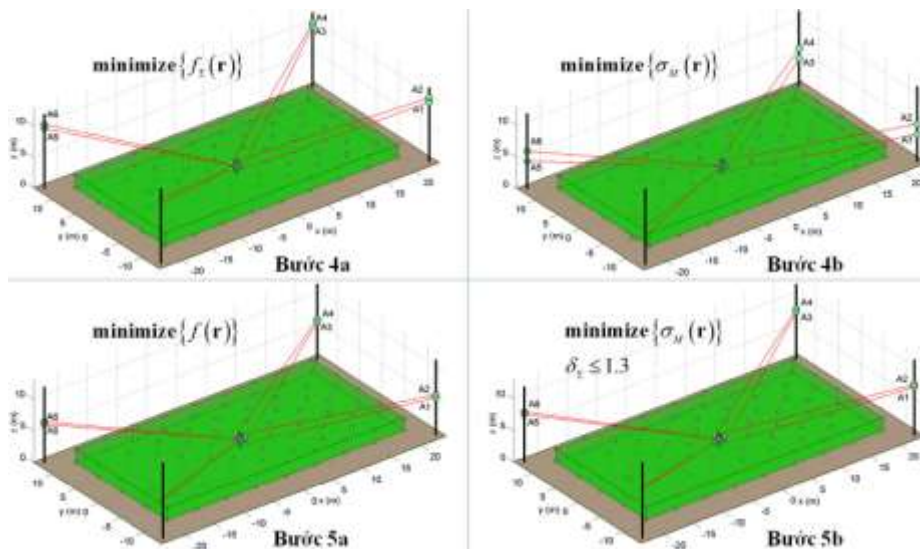
(ở đây,  $f$  là hàm mục tiêu được định nghĩa trong (21)). Trong bước 5a, các giá trị của  $\delta_{\Sigma}$  và  $\delta_M$  khá gần với 1 bởi vì chúng ta xét mức độ ưu tiên của hai tiêu chí là như nhau. Trong khi đó, ở bước 5b, mặc dù ta nhận được giá trị tương đối lớn của  $\delta_M$ , giá trị này vẫn nhỏ hơn rất nhiều so với giá trị nhận được trong bước 4a.

### 5. Kết luận

Một phương pháp tìm kiếm tham số thiết kế kết cấu tối ưu cho một loại robot song song dạng treo, truyền động bằng dây cáp đã được trình bày trong bài báo này.

Các tham số thiết kế tối ưu của robot được tính toán nhờ giải một bài toán tối ưu đa mục tiêu với các điều kiện biên phi tuyến. Hai tiêu chuẩn đánh giá chất lượng hoạt động của robot được sử dụng. Mức độ tiêu hao năng lượng của robot được ước lượng bởi tiêu chuẩn tổng các sức căng trong dây cáp của robot, trong khi tiêu chuẩn chặn trên chuẩn hóa của biên độ lắc của phần công tác được sử dụng để đánh giá độ cứng của robot.

Một quy trình có tính hệ thống đã được đề xuất để xác định tham số thiết kế của robot và được minh họa qua một ví dụ ứng dụng CDPR trong sản xuất nông nghiệp. Phương pháp này đem đến một tập hợp các giải pháp tiềm năng mà trong đó độ thỏa hiệp giữa các tiêu chuẩn đánh giá chất lượng hoạt động của robot được cân nhắc một cách hiệu quả.



H. 5 Kết quả giải các bài toán tối ưu trong các bước khác nhau



Giải pháp được trình bày trong bài báo này có thể được áp dụng để giải quyết những bài toán thiết kế (hoặc cấu hình lại) của các loại robot song song truyền động bằng dây cáp khác.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] Albus J., Bostelman R., and Dagalakis N.: *The NIST robocrane*, Journal of Robotic Systems, vol. 10, no. 5, pp. 709-724, 1993.
- [2] Havlik S.: *A cable-suspended robotic manipulator for large workspace operations*, Computing aided Civil Infrastructure Engineering, vol. 15, no. 6, pp. 56-68, 2000.
- [3] Alp A. B. and Agrawal S. K.: *Cable suspended robots: design, planning and control*, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2002, pp. 4275-4280, 2002.
- [4] Oh S.-R. and Agrawal S. K.: *The feasible workspace analysis of a set point control for a cable-suspended robot with input constraints and disturbances*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 14, no. 4, pp. 735-742, 2006.
- [5] Bouchard S., Gosselin C.: *Kinematic sensitivity of a very large cable-driven parallel mechanism*, ASME International Design Engineering Technical Conferences, 2006.
- [6] Hassan M., Khajepour A.: *Analysis of Large-Workspace Cable-Actuated Manipulator For Warehousing Applications*, ASME International Design Engineering Technical Conference, 2009.
- [7] Duan B., Qiu Y., Zhang F., Zi B.: *On design and experiment of the feed cable-suspended structure for super antenna*, Mechatronics, vol. 19, pp. 503-509, 2009.
- [8] Riehl N., Gouttefarde M., Krut S., Baradat C. and Pierrot F.: *Effects of non-negligible cable mass on the static behavior of large workspace cable-driven parallel mechanisms*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2193-2198, 2009.
- [9] Gouttefarde M., Collard J., Riehl N., Baradat C.: *Simplified static analysis of large-dimension cable-driven parallel robots*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2299-2305, 2012.
- [10] Li H., Zhang X., Yao R., Sun J., Pan G. and Zhu W.: *Optimal Force Distribution based on slack rope model in the incompletely constrained cable-driven parallel mechanism of FAST telescope*, Cable-Driven Parallel Robots, Mechanism and Machine Science, Springer, vol. 2, pp 87-102, 2013.
- [11] Yao R., Tang X., Wang J., Huang P.: *Dimensional Optimization Design of the Four-Cable-Driven Parallel Manipulator in FAST*, IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, vol. 15, no. 6, pp. 932-941, 2010.
- [12] Rao R., Li H., Zhang X.: *A modeling Method of the Cable-Driven Parallel Manipulator for FAST*, Cable-Driven Parallel Robots, Mechanism and Machine Science, Springer, vol. 12, pp. 423-436, 2013.
- [13] Lamaury J., Gouttefarde M.: *Control of a Large Redundantly Actuated Cable-Suspended Parallel Robots*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2013.
- [14] Nguyen D. Q., Gouttefarde M., Company O. and Pierrot F.: *On the simplifications of cable model in static analysis of large-dimension cable-driven parallel robots*, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 928-934, 2013.
- [15] Merlet J.-P., Daney D.: *A portable, modular parallel wire crane for rescue operations*, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 2834-2839, May 2010.
- [16] Nguyen D. Q., Gouttefarde M., Company O. and Pierrot F.: *On the Analysis of Large-Dimension Reconfigurable Suspended Cable-Driven Parallel Robots*, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 5728-5735, 2014.
- [17] Nguyen D. Q., Gouttefarde M.: *Study of Reconfigurable Suspended Cable-Driven Parallel Robots for Airplane Maintenance*, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2014), Chicago, USA, pp. 1682-1689, 2014.
- [18] Zhou X., Tang C. P., and Krovi V.: *Cooperating Mobile Cable Robots: Screw Theoretic Analysis*, Berlin Heidelberg, vol. 57, pp. 109-123, May 2013. Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer
- [19] Censor Y.: *Pareto Optimality in Multiobjective Problems*, Appl. Math. Optimiz., vol. 4, pp. 41-59, 1977.
- [20] Pascal L., Zheng Y.-Q., Liu Xi.-W.: *Stiffness Analysis of Wire-Driven Parallel Kinematic Manipulators*, Proceedings of the 11<sup>th</sup> World Congress in Mechanism and Machine Science, IFToMM, Tianjin, China, April 2004.
- [21] MATLAB: *Global Optimization Toolbox*. <http://www.mathworks.com>
- [22] Rao S. S.: *Engineering Optimization: Theory and Practice*, John Wiley & Sons, 2009.
- [23] Lamaury J., Gouttefarde M.: *A tension distribution method with improved computation efficiency*, Cable-Driven Parallel Robots, Mechanisms and Machine Science, Springer, vol. 12, pp. 71-85, 2013
- [24] Lamaury J., Gouttefarde M., Michelin M., Tempier O.: *Design and control strategies of a redundant suspended cable-driven parallel*

- robot, Advances in robot kinematics (ARK), Springer, Berlin, pp 237-244.
- [25] Gouttefarde M., Daney D., Merlet J.-P.: *Interval-Analysis-Based Determination of the Wrench-Feasible Workspace of parallel Cable-Driven Robots*, IEEE Transactions on Robotics, vol. 27, No. 1, pp. 1-13, 2011.
- [26] Irvine M.: *Cable Structures*, Cambridge, MA: MIT Press, 1981
- [27] Thai H.-T., Kim S.-E.: *Nonlinear static and dynamic analysis of cable structures*, Finite Elements in Analysis and Design, vol. 47, no. 3, pp. 237-246, 2011.
- [28] Ericson C.: *Real-Time Collision Detection*, Morgan Kaufmann, 2005.
- [29] Lahouar S., Ottaviano E., Zeghoul S., Romdhanec L., Ceccarelli M.: *Collision free path-planning for cable-driven parallel robots*, Robotics and Autonomous Systems, pp. 1083-1093, 2009.
- [30] Nguyen D. Q., Gouttefarde M.: *On the Improvement of Cable Collision Detection Algorithms*, Cable-Driven Parallel Robots, T. Bruckmann and A. Pott eds., Springer, pp. 29-40, 2014.



**Nguyễn Đình Quân** sinh năm 1985. Anh nhận bằng cử nhân KSTN chuyên ngành ĐKTD K48 tại Đại học Bách Khoa Hà Nội (HUST) năm 2008. Năm 2009-2011 anh hoàn thành khóa học thạc sĩ về robot tiên tiến (EMARO) ở châu Âu. Giai đoạn 2011-2014, anh hoàn thành chương trình nghiên cứu sinh chuyên

ngành hệ thống tự động và vi điện tử tại trung tâm nghiên cứu LIRMM, trường đại học Montpellier 2 (cộng hòa Pháp), là một thành viên trong dự án CableBOT (cablebot.eu), nghiên cứu sâu về loại robot song song truyền động bằng dây cáp. Hiện anh đang là nghiên cứu viên của Bộ môn Robot Đặc Biệt & Cơ Điện Tử, Khoa Hàng Không Vũ Trụ (FAS), ĐH Kỹ Thuật Lê Quý Đôn. Hướng nghiên cứu chính là thiết kế và thực hiện các hệ thống robot, điều khiển và các hệ nhúng.