

# NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN ĐỘI HÌNH LEADER-FOLLOWER TRONG HỆ THỐNG ĐA ROBOT

RESEARCH ON LEADER – FOLLOWER FORMATION CONTROL  
OF MULTI-ROBOT SYSTEMS

**SVTH:** Ngô Thị Xuân Thành<sup>1</sup>, Nguyễn Tân Thuyền<sup>2</sup>, Lê Minh Tú<sup>3</sup>

Lớp: 15TDHCLC, Khoa Điện, Trường Đại học Bách Khoa – Đại học Đà Nẵng

Email: [1xuanthanh2357@gmail.com](mailto:1xuanthanh2357@gmail.com), [2nguyentanthuyen.tdhclc@gmail.com](mailto:2nguyentanthuyen.tdhclc@gmail.com),

[3tlminh878@gmail.com](mailto:3tlminh878@gmail.com)

**GVHD:** TS. Trần Thị Minh Dung

Khoa Điện, Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng; Email: [ttmdung@du.t.udn.vn](mailto:ttmdung@du.t.udn.vn)

**Tóm tắt** - Bài báo này nghiên cứu thuật toán điều khiển đội hình leader-follower áp dụng cho hệ robot di động. Tùy theo mục đích và yêu cầu của ứng dụng, các robot follower di chuyển và duy trì khoảng cách tương đối với robot leader để giữ đội hình không đổi. Các mô phỏng được thực hiện để đánh giá tính hiệu quả của thuật toán khi phối hợp một nhóm ba robot trong ứng dụng hợp tác vận chuyển vật.

**Từ khóa** - (cooperative control, formation control, leader-follower, multiple mobile robots, cooperative transport)

## 1. Đặt vấn đề

Với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ tự động hóa, robot đã và đang ngày càng hoàn thiện hơn khi có thể thực hiện các công việc phức tạp và có độ chính xác cao. Tuy nhiên, trong một vài trường hợp, việc sử dụng một robot riêng lẻ để hoàn thành công việc là bất khả thi như nâng một vật nặng hay phối hợp trong các tác vụ ở những vị trí khác nhau. Điều này đặt ra vấn đề cần phải phối hợp một nhóm nhiều robot, hợp tác cùng nhau trong các nhiệm vụ. Điều khiển hợp tác (cooperative control) đã và đang trở thành một chủ đề nhận được nhiều sự quan tâm trong lĩnh vực điều khiển các hệ thống robot. Việc phối hợp một nhóm các thiết bị như robot cùng làm việc với nhau có lợi thế tiềm năng hơn khi có thể thực hiện các nhiệm vụ có tính chất phức tạp mà một robot không thể thực hiện được như: giám sát đa điểm, lập bản đồ, trình diễn nghệ thuật hay vận chuyển hợp tác [1].

Nhờ phạm vi ứng dụng rộng rãi, điều khiển đội hình (formation control) là một trong những hướng nghiên cứu nhận được nhiều sự quan tâm trong điều khiển hợp tác robot di động. Mục tiêu chính của điều khiển đội hình là phối hợp một nhóm các thiết bị thông minh như robot tạo thành một số dạng hình học mong muốn, để một số nhiệm vụ có thể được hoàn thành nhờ sự cộng tác của các robot. Ba phương pháp được nghiên cứu phổ biến trong điều khiển đội hình là: điều khiển behavior-based [2][3], điều khiển leader-follower [4][5][6][7][8], điều khiển virtual-structure [9][10][11]. Trong điều khiển behavior-based, một số hành vi mong muốn (tránh vật cản, tránh va chạm,...) được chỉ định cho mỗi robot và hành động cuối cùng của nhóm robot được quyết định bởi “tầm quan trọng tương đối” của từng hành vi. Nhược điểm của phương pháp này là khó mô tả chính xác động lực học và đảm bảo sự ổn định của toàn hệ thống. Trong điều khiển virtual-structure, đội hình robot được xem như một cấu trúc vật lý (hình vuông, hình tròn,...) và quỹ đạo tham chiếu của mỗi robot phụ thuộc vào chuyển động của điểm ảo (virtual center).

**Abstract** - This paper studies leader-follower formation control in mobile robots systems. Based on the purpose and feasibility of the application, followers move and keep the relative distance from leader to maintain the required formation. Some simulations are presented in order to validate the performance of the algorithm for a team of mobile robots in cooperative object transport application.

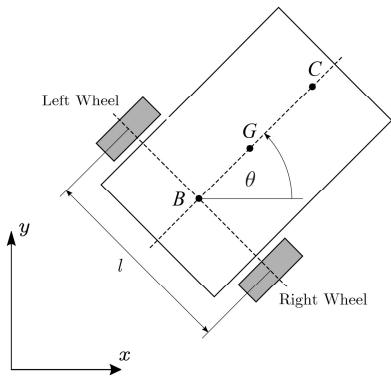
**Key words** - (cooperative control, formation control, leader-follower, multiple mobile robots, cooperative transport)

Ưu điểm của phương pháp này là tính bền vững và bởi sự ràng buộc chặt chẽ giữa các robot trong đội hình. Nhược điểm của cả hai phương pháp trên thường sử dụng cấu trúc điều khiển tập trung, các robot được và giám sát qua hệ thống camera và điều khiển thông qua một trạm xử lý trung tâm, do vậy sẽ gây nên những hạn chế trong một số ứng dụng. Với phương pháp điều khiển leader-follower, một hay một số robot sẽ được chỉ định là robot “đầu” (leader), di chuyển theo quỹ đạo được định trước. Các robot còn lại (followers) di chuyển duy trì khoảng cách và góc lệch tương đối với leader để giữ đội hình không đổi. Ưu điểm của điều khiển leader-follower so với hai phương pháp trên là dễ tiếp cận và thực hiện vì áp dụng cấu trúc điều khiển phân tán, các robot được điều khiển thông qua dữ liệu của robot lân cận nên không yêu cầu các thiết bị định vị và giám sát. Nhược điểm dễ thấy là không có phản hồi từ các follower gửi về cho leader, do vậy, nếu follower bị tác động bởi nhiều, đội hình sẽ không còn được duy trì.

Bài báo này tập trung nghiên cứu điều khiển đội hình leader-follower trong hệ thống robot di động, bao gồm nghiên cứu lý thuyết về mô hình động học robot, lý thuyết đô thị, luật điều khiển leader-follower, mô hình hóa và mô phỏng hệ thống trên phần mềm Matlab/Simulink.

## 2. Mô hình động học robot di động

Robot được sử dụng là loại chuyển động dựa trên hai bánh xe được điều khiển độc lập và một bánh lái. Chuyển động của robot được phân tích thông qua chuyển động của khối tâm robot. Giả thiết rằng các robot chuyển động không trượt, môi trường không có vật cản và không có nhiều tác động lên robot. Xét hệ tọa độ  $xOy$  cố định gắn với mặt phẳng chuyển động. Vị trí của robot được mô tả bởi vector trạng thái  $\mathbf{p} = (x, y, \theta)^T$ , trong đó  $(x, y)$  là tọa độ của robot,  $\theta$  là góc định hướng chuyển động (hình 1).



Hình 1. Mô hình robot di động.

Phương trình động học mô tả chuyển động của robot:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos(\theta) \\ \dot{y} = v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó  $v[m/s]$ ,  $\omega[rad/s]$  là vận tốc và vận tốc góc của robot. Mối quan hệ giữa vận tốc và vận tốc góc của robot với tốc độ góc của hai bánh xe được xác định bởi:

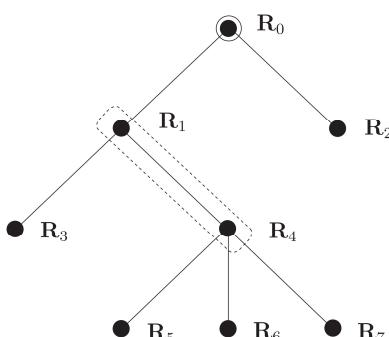
$$\begin{cases} v = \frac{r(\omega_R + \omega_L)}{2} \\ \omega = \frac{r(\omega_R - \omega_L)}{l} \end{cases} \quad (2.a); \quad \begin{cases} \omega_R = \frac{v}{r} + \frac{l\omega}{2r} \\ \omega_L = \frac{v}{r} - \frac{l\omega}{2r} \end{cases} \quad (2.b)$$

Trong đó  $\omega_R[rad/s]$ ,  $\omega_L[rad/s]$  là tốc độ góc của bánh phải và bánh trái;  $r[m]$  là bán kính bánh xe;  $l[m]$  là khoảng cách giữa hai bánh.

### 3. Thuật toán điều khiển đội hình leader-follower

#### 3.1. Giản đồ điều khiển

Trong một hệ đa robot được kết nối, mỗi quan hệ giữa mỗi robot và các robot lân cận được mô tả bởi sơ đồ hình học gọi là “giản đồ điều khiển” (control graph). Mỗi robot được xem là một nút (node) và kết nối giữa hai robot lân cận là một biến trong giản đồ đó. Độ dài biến thể hiện sự ràng buộc khoảng cách giữa các robot được kết nối và mục tiêu của luật điều khiển là giữ vững sự ràng buộc ấy.



Hình 2. Giản đồ điều khiển đội hình.

Từ một cặp leader-follower, ta mở rộng cho đội hình theo thứ bậc (hierarchical formation) với các leader phụ và chuyển động của các follower phụ thuộc vào leader tương ứng của nó. Như vậy, trong đội hình có thể có nhiều leader nhưng chỉ duy nhất  $R_0$  là leader chính. Khi đó ta có đồ thị hình cây mở rộng (spanning-tree) với  $R_0$  là rễ (root). Theo

giản đồ trên,  $R_0$  là leader so với  $R_1$  và  $R_2$ , còn  $R_4$  là leader tương đối so với các robot  $R_5, R_6, R_7$ .

#### 3.2. Luật điều khiển leader-follower.

Đặt các bộ số cho trước:  $D = \{d_i : d_i > 0, i = 1, \dots, n\}$  và  $\Phi = \left\{ \phi_i : |\phi_i| < \frac{\pi}{2}, i = 1, \dots, n \right\}$ . Đặt  $n_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  sao cho  $n_i \in \{0, \dots, i-1\}$ . Một nhóm gồm  $(n+1)$  robot  $R_0, R_1, \dots, R_n$  tạo thành một đội hình  $(D, \Phi)$  với các leaders tương ứng  $R_0, R_{n_1}, \dots, R_{n_n}$  nếu  $\forall t \geq 0$ ,  $i = 1, \dots, n$ :

$$\|R_{n_i}(t) - R_i(t)\| = d_i \quad (3)$$

$$\arg(R_{n_i}(t) - R_i(t)) - \theta_i = \phi_i \quad (4)$$

Theo sơ đồ trên,  $R_0$  là leader chính, di chuyển tự do với vận tốc  $(v_0, \omega_0) \in \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}$  và tồn tại các giới hạn

$$0 < v_0(t) \leq V_0, \quad K_0^- \leq \kappa_0 = \frac{\omega_0(t)}{v_0(t)} \leq K_0^+, \quad \text{trong đó}$$

$V_0, K_0 \in \mathbb{R}^+$  lần lượt là vận tốc cực đại và quỹ đạo cong

tối đa, với  $\kappa = \frac{\omega_0}{v_0}$  là quỹ đạo cong tức thời của robot. Khi đó, mục tiêu là điều khiển các robot follower giữ vị trí không đổi so với leader tương ứng của nó. Để ý rằng, đội hình tồn tại khi các khoảng cách  $d_i$  giữa mỗi cặp leader-follower phải thỏa điều kiện  $d_i \geq d_{min} > 0$ , với  $d_{min}$  là khoảng cách tối thiểu để tránh xảy ra va chạm nội giữa các robot. Ngoài ra vận tốc của các follower phải thỏa mãn các giới hạn  $0 < v_i(t) \leq V_i$ ,  $K_i^- \leq \kappa_i = \frac{\omega_i(t)}{v_i(t)} \leq K_i^+$ .

Theo [7], luật điều khiển leader-follower tổng quát được cho bởi:

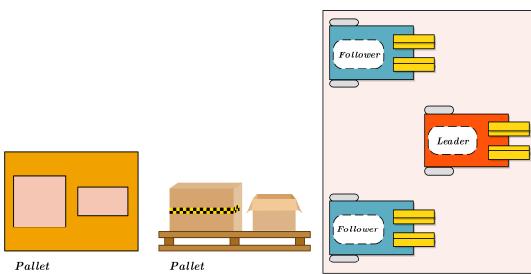
$$\begin{aligned} v_i &= v_{n_i} \frac{\cos(\beta_i - \phi_i)}{\cos \phi_i} \\ \omega_i &= v_{n_i} \frac{\sin \beta_i}{d_i \cos \phi_i} \end{aligned} \quad (5)$$

Với  $\beta_i(t) = \theta_{n_i}(t) - \theta_i(t)$ .

Khi đó, luật điều khiển chỉ ra rằng, nếu tại thời điểm ban đầu  $t = 0$ , các robot tạo thành đội hình  $(D, \Phi)$ , luật điều khiển (5) đặt ra vận tốc cho các follower theo vận tốc của leader tương ứng và sai lệch góc định hướng  $\beta_i$  để  $\forall t \geq 0$ , các giá trị trong bộ số  $(D, \Phi)$  luôn được giữ không đổi với giá trị tham chiếu  $(D^{ref}, \Phi^{ref})$ , nghĩa là đội hình được giữ không đổi theo thời gian.

#### 4. Kết quả mô phỏng.

Một trong những ứng dụng phổ biến của điều khiển đội hình là phối hợp một nhóm các robot cùng vận chuyển một vật nặng. Tùy thuộc vào mục đích ứng dụng, kích thước và khối lượng của vật, đội hình sẽ thay đổi theo phù hợp. Ba robot xuất phát ở vị trí ban đầu mà tại đó các robot tạo thành một đội hình tam giác. Mục tiêu là các robot mang vật, di chuyển từ điểm đầu đến điểm cuối sao cho đội hình luôn được giữ không đổi để vật không bị rơi trong quá trình vận chuyển. Ở đây ta chỉ xét đến mô hình động học và chấp nhận bỏ qua động lực học của động cơ. Xem như các robot là lý tưởng, đáp ứng được các giới hạn vận tốc mà luật điều khiển đặt ra. Giả sử rằng các robot chuyển động không trượt, môi trường không có vật cản và không có nhiễu tác động lên các robot.. Các mô phỏng được thực hiện trên phần mềm Matlab/Simulink. Thông số của robot được sử dụng trong mô phỏng:  $r = 0,1(m)$ ,  $l = 0,5(m)$ .



Hình 3. Phối hợp robot trong vận chuyển vật.

Xét đội hình ba robot vận chuyển vật gồm một leader và hai follower. Vị trí ban đầu các robot ( $t = 0$ ):

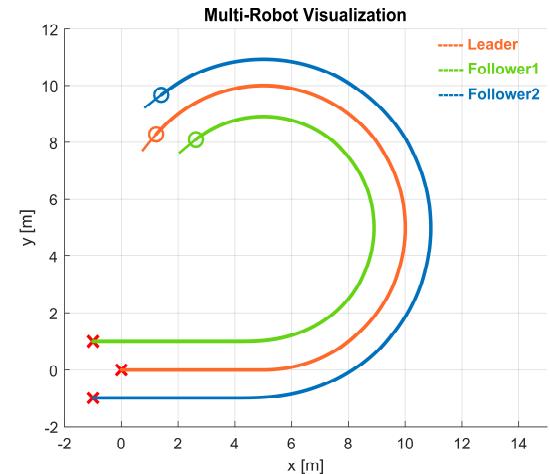
$$+ \text{Leader: } (x_L(0), y_L(0), \theta_L(0))^T = (0, 0, 0)^T.$$

+ Follower1 (F1) và Follower2 (F2):

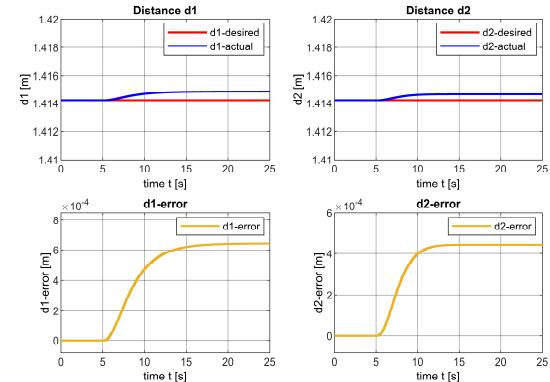
$$(x_{F1}(0), y_{F1}(0), \theta_{F1}(0))^T = (-1, 1, 0)^T$$

$$(x_{F2}(0), y_{F2}(0), \theta_{F2}(0))^T = (-1, -1, 0)^T.$$

Khi đó, tại thời điểm ban đầu các robot tạo thành đội hình  $d_1^{ref} = d_2^{ref} = \sqrt{2}(m)$ ,  $\phi_1^{ref} = -\frac{\pi}{4}$ ,  $\phi_2^{ref} = \frac{\pi}{4}$ . Robot leader di chuyển với vận tốc  $v_L(t) = 1(m/s)$ , chọn  $V_L = 1(m/s)$ ; vận tốc góc  $\omega_L(t) = 0$  khi  $0 < t \leq 5s$  và  $\omega_L(t) = 0,2(rad/s)$  khi  $5s < t \leq 25s$ . Đặt các giới hạn tốc độ cho hai robot follower1 và follower2:  $0 < v_{F1} \leq V_{F1} = 2(m/s)$ ,  $|\omega_{F1}| \leq \Omega_{F1} = 0,8(rad/s)$ ;  $0 < v_{F2} \leq V_{F2} = 2(m/s)$ ,  $|\omega_{F2}| \leq \Omega_{F2} = 0,8(rad/s)$ .



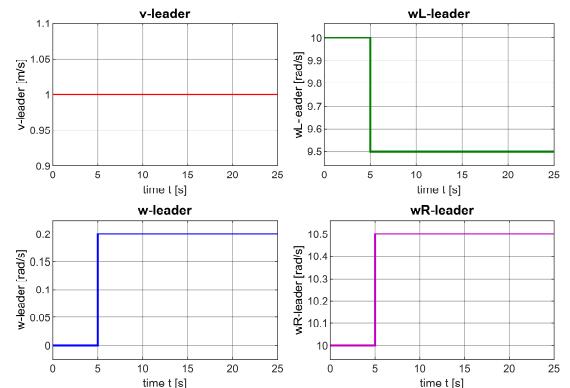
Hình 4. Quỹ đạo ba robot.



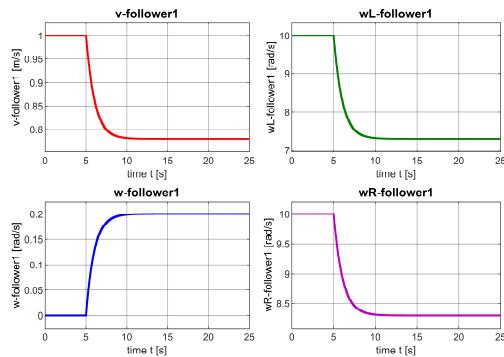
Hình 5. Khoảng cách giữa các follower so với leader.

Quỹ đạo của các robot được thể hiện trong hình 4. Từ kết quả mô phỏng có thể thấy thuật toán cho đáp ứng tốt. Khi phối hợp ba robot cùng vận chuyển hàng, đội hình gần như không đổi so với vị trí ban đầu. Theo hình 5, các follower di chuyển giữ vị trí tương đối so với leader khi sai lệch khoảng cách giữa follower1 so với leader khoảng  $6 \cdot 10^{-4}(m) \approx 0,6(mm)$  và sai lệch khoảng cách giữa follower2 so với leader là  $4 \cdot 10^{-4}(m) \approx 0,4(mm)$  là không đáng kể. Như vậy vật không bị rơi trong quá trình vận chuyển.

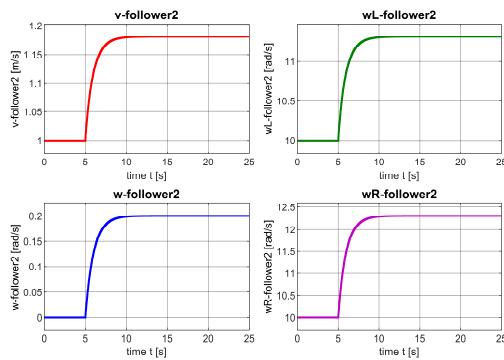
Ngoài ra, vận tốc và vận tốc góc cùng tốc độ hai bánh xe tương ứng của các robot leader và follower được thể hiện trong các hình 6, hình 7 và hình 8.



Hình 6. Tốc độ robot leader.



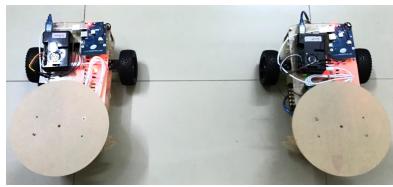
Hình 7. Tốc độ robot follower1.



Hình 8. Tốc độ robot follower2.

## 5. Mô hình thực nghiệm

Để thực thi thuật toán, chúng tôi đề xuất mô hình hai robot di động cho thí nghiệm hợp tác vận chuyển vật:



Hình 9. Mô hình robot thực nghiệm.

Robot được điều khiển độc lập thông qua hai bánh xe có bán kính  $r = 4,25\text{ (cm)}$  được gắn trên trực nối có chiều dài  $l = 25\text{cm}$  và một bánh lái. Mỗi bánh xe được truyền động bởi động cơ một chiều DC motor 12V, được trang bị

hộp số có tỉ số truyền 1 : 34, tốc độ sau hộp số đạt tối đa  $280\text{ (rpm)} \approx 29,32\text{ (rad / s)}$  và encoder quang có độ phân giải 374 xung. Đơn vị xử lý trung tâm của robot là máy tính nhúng Raspberry Pi 3B+ và board điều khiển Arduino Uno R3 để thực hiện tính toán và các yêu cầu phức tạp khác như truyền thông, gửi nhận dữ liệu giữa các robot.

## Tài liệu tham khảo

- [1] D. Cruz, J. McClintock, B. Perteet, O. A. A. Orqueda, Y. Cao, R. Fierro, "Decentralized cooperative control - A multivehicle platform for research in networked embedded systems," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 27, no. 3, pp. 58-78, 2007.
- [2] T. Balch, R. C. Arkin, "Behavior-based formation control for multirobot teams," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 6, pp. 926-939, 1998.
- [3] J. R. T. Lawton, R. W. Beard, B. J. Young, "A decentralized approach to formation maneuvers," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 19, no. 6, pp. 933-941, Dec 2003.
- [4] A. K. Das, R. Fierro, V. Kumar, J. P. Ostrowski, J. Spletzer, C. J. Taylor, "A vision-based formation control framework," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 5, pp. 813-825, 2002.
- [5] J. P. Desai, J. P. Ostrowski, V. Kumar, "Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 6, pp. 905-908, 2001.
- [6] L. Consolini, F. Morbidi, D. Prattichizzo, M. Tosques, "On the Control of a Leader-Follower Formation of Nonholonomic Mobile Robots," in *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision & Control*, San Diego, CA, USA, 2006.
- [7] L. Consolini, F. Morbidi, D. Prattichizzo, M. Tosques, "A Geometric Characterization of Leader-Follower Formation Control," in *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, 2007.
- [8] L. Consolini, F. Morbidi, D. Prattichizzo, M. Tosques, "Leader-Follower Formation Control of Nonholonomic Mobile Robots with Input Constraints," *Automatica*, vol. 44, no. 5, pp. 1343-1349, May 2008.
- [9] Kar-Han Tan, M. A. Lewis, "High Precision Formation Control of Mobile Robots Using Virtual Structures," *Autonomous Robots*, vol. 4, no. 4, pp. 387-403, 1997.
- [10] T. H. A. van den Broek, N. van de Wouw, H. Nijmeijer, "Formation control of unicycle mobile robots: a virtual structure approach," in *Proceedings of the 48h IEEE Conference on Decision and Control*, Shanghai, China, 2009.
- [11] A. Sadowska, T. H. A. van den Broek, H. Huijbets, N. van de Wouw, Kostic, H. Nijmeijer, "A virtual structure approach to formation control of unicycle mobile robots using mutual coupling," *International Journal of Control*, vol. 84, no. 11, p. 1886-1902, 2 November 2011.