ロボット間の通信遅れを考慮した人間—ロボティックネットワークの 協調制御：受動性アプローチ

山内 淳 矢*・Made Widhi Surya ATMAN**

畑中 健 志**・藤田 政 之**

Cooperative Control of Human-robotic Network under Inter-robot Communication Delay: A Passivity Approach

Junya YAMAUCHI*, Made Widhi Surya ATMAN**,
Takeshi HATANAKA** and Masayuki FUJITA**

In this paper, we propose a robotic network cooperative control law under inter-robot communication delay. This controller guarantees human operator enabled positions/velocities synchronization of robotic network to human desired values. First, we show passivity of the interconnected system of each robot and proposed control law. Furthermore, passivity of robotic network is also shown by applying scattering transformation to communication channels between each robot. Then, positions/velocities synchronization to human desired values are proved with input strict passivity assumptions of human's decision making process. Finally, we demonstrate the effectiveness of the presented control law through simulation and experiment.

Key Words: cooperative control, passivity-based control, human-robotic network, synchronization

1. はじめに

センサを搭載した複数台の移動ロボットを、環境のモニタリングや保全活動に利用する試みが行なわれている¹⁾。たとえば文献2)は、海洋における空間的・時間的に分散したさまざまなデータ採集を行ない、海洋モデルを構築している。また、市街地におけるセキュリティの向上に向けた研究もなされている³⁾。

以上のシナリオにおいて、分散的な情報処理と交換をもとに目的の達成を図る制御は協調制御とよばれ、これまでシステム制御の分野において活発に研究がなされてきた^{4)~6)}。一方で、不確かな環境において、システムの運用を完全に自動化することは困難である。そこで、ロボット群の協調制御に、人間の柔軟な意思決定をロボット群に介入させる試みがある⁷⁾。著者らは、受動性に基づくアプローチ⁸⁾でこの枠組みに取り組み、すべてのロボットの位置もしくは速度を人間がもつ目

Fig. 1 Conceptual diagram of human-robotic network

標の値に同期させる協調制御則を提案した^{9),10)}。

文献9),10)では、人間とロボット群が通信し合い、人間が所望する任意の位置や速度にロボット群を同期させるFig.1に示すシステムの構築を行なった。そこでは人間とロボティックネットワーク間、ロボットとロボット間の2種類の通信を想定している。実際の通信には遅れが存在し、通信遅れがシステムの安定性を損なう可能性があることが指摘されている¹¹⁾。そこで著者らは、ロボット間の通信に遅れが存在する状況を想定し、文献11)に基づいてすべてのロボットを人間が所望する位置に収束させる協調制御則を提案した¹²⁾。

本論文ではさらに、文献12)で提案した制御則が、人間の目標速度に関してもすべてのロボットの速度を収束させることができることを示す。まず、各ロボットと提案する協調制御則の結合システムが受動的であることを示す。また、遅れのある通信路にスキッタリング変換^{8),11)}を適用すること

* 東京工業大学理工学研究科 東京都目黒区大岡山 2-12-1

** 東京工業大学工学院 東京都目黒区大岡山 2-12-1

* Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo

** School of Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo

(Received April 14, 2017)

(Revised September 28, 2017)

で、ロボティックネットワーク全体が受動的となることを示す。さらに、人間オペレータに関する仮定のもとで、提案する制御則が各ロボットの位置もしくは速度を、人間オペレータの所望の値にそれぞれ同期させることを証明する。最後に、シミュレーションと実験によって提案手法の有効性を示す。文献 12) では実験検証の際に、人間オペレータが与えられた仮定を満たすかどうかを確認していない。そこで本論文では、文献 9), 10) で行なったシステム同定の方法を用いて、人間オペレータに与えられた仮定を満たすモデルを用いてシミュレーション検証を行なう。これにより、定理の妥当性を検証する。実験では、実際に人間オペレータがロボティックネットワークと相互にやり取り可能な実験システムを構築し、提案手法の有効性を確認する。

2. 問題設定

2.1 システムの概要と目的

本論文では、 n 台のロボットを考える。各ロボットのダイナミクスは次式で表わされるとする。

$$\dot{q}_i(t) = u_i(t) \quad i \in \mathcal{V} = \{1, \dots, n\} \quad (1)$$

ここで、 $q_i(t) \in \mathbb{R}^2$ は各ロボットの 2 次元平面上の位置、 $u_i(t) \in \mathbb{R}^2$ は速度入力、 $\mathcal{V} = \{1, \dots, n\}$ は n 台のロボットからなる集合を表わす。このとき、通信構造をグラフ $\mathcal{G}$ によってモデル化し、 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ 、 $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ と表記する。本論文では、グラフ $\mathcal{G}$ に以下の仮定を設ける。

[仮定 1] グラフ $\mathcal{G}$ は無向な連結グラフである。

つぎに、人間オペレータはある部分集合 $\mathcal{V}_h \subseteq \mathcal{V}$ に属するロボットにのみアクセス可能であるとする。ここで、 $|\mathcal{V}_h|$ を $\mathcal{V}_h$ に属する要素の数とし、 $|\mathcal{V}_h| \geq 1$ であるとする。

本論文では、以上の情報交換の制約のもとで、すべてのロボットの位置もしくは速度を人間の目標値に同期させることを目的とし、それぞれを位置同期と速度同期と呼ぶことにする。位置同期の目的は、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|q_i(t) - q_r\| = 0 \quad \forall i \in \mathcal{V} \quad (2)$$

であり、速度同期は

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\dot{q}_i(t) - v_r\| = 0 \quad \forall i \in \mathcal{V} \quad (3)$$

である。ただし、 q_r, v_r はそれぞれ人間がもつ一定の目標位置と速度とする。人間オペレータは上記目的 (2), (3) のいずれかをあらかじめ選択するものとする。

注意として、上記の制約のもとでロボット群が選択された目的を共有するためには、情報のブロードキャストが必要となる。本論文では、実装を容易にするために、これを想定せず、ロボットの制御則を目的に応じて切り替えることはしないものとする。他方、人間オペレータ側の処理を切り替えることに技術的な問題は存在しないため、これは可能であるとする。

以降では、目的 (2), (3) に応じてそれぞれ位置制御モード

と速度制御モードと呼ぶ。

(注意) 文献 9), 10) では速度制御モードの目的として、(3) 式に加え、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|q_i(t) - q_j(t)\| = 0 \quad \forall i, j \in \mathcal{V} \quad (4)$$

も課しているが、本論文では (3) 式のみを扱う。

2.2 通信遅れがない状況下でのシステム構造

本論文では、(1) 式の入力を次式のように 2 種類の信号 $u_{r,i}(t), u_h(t)$ から構成する。

$$u_i(t) := u_{r,i}(t) + \delta_i u_h(t) \quad i \in \mathcal{V} \quad (5)$$

パラメータ $\delta_i \forall i \in \mathcal{V}$ を導入し、 i 番目のロボットが $\mathcal{V}_h$ に属するとき $\delta_i = 1$ 、属さないとき $\delta_i = 0$ とする。ここで、 $u_{r,i}(t)$ はロボット間の同期を達成するための入力であり、先行研究 9), 10) では次式が用いられている。

$$u_{r,i}(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}(q_j(t) - q_i(t)) - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} b_{ij}(\xi_j(t) - \xi_i(t)) \quad (6a)$$

$$\dot{\xi}_i(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} b_{ij}(q_j(t) - q_i(t)) \quad (6b)$$

ただし、 $\xi_i(t) \in \mathbb{R}^2$ であり、 $\mathcal{N}_i := \{j \in \mathcal{V} \mid (i, j) \in \mathcal{E}\}$ とする。ここで、 i, j 番目のロボット間で通信をしているとき、つまり $(i, j) \in \mathcal{E}$ であるとき $a_{ij} = a_{ji} > 0, b_{ij} = b_{ji} > 0$ とし、それ以外では $a_{ij} = b_{ij} = 0$ とする。

人間オペレータはロボティックネットワークからの情報 $y_h(t)$ と自身もつ位置目標値 q_r もしくは速度目標値 v_r をもとに $u_h(t)$ を決定するものとする。ここで、アクセス可能なロボットの平均位置および平均速度を、

$$z_q(t) := \frac{1}{m} \sum_{i \in \mathcal{V}_h} q_i(t), \quad z_v(t) := \frac{1}{m} \sum_{i \in \mathcal{V}_h} \dot{q}_i(t) \quad (7)$$

と表記する。ただし、 m はアクセス可能なロボットの台数とする。このとき、つぎの補題が成り立つ^{9), 10)}。

[補題 1] 仮定 1 のもとで、(1)~(7) 式から構成されるシステムは、 $u_h(t)$ から $z_q(t)$ までエネルギー関数 $S_i^q := (\|q_i\|^2 + \|\xi_i\|^2)/2$ に関して受動的である。また、 $u_h(t)$ が微分可能であるとき、システムは $\dot{u}_h$ から z_v までエネルギー関数 $S_i^v := (\|\dot{q}_i\|^2 + \|\dot{\xi}_i\|^2)/2$ に関して受動的である。

文献 9), 10) では、受動的なシステム同士を負フィードバックで結合すると受動性が保たれるという受動性の特性と上記補題に基づき、 $y_h(t) = z_q(t)$ もしくは $y_h(t) = z_v(t)$ とし、人間の意思決定過程に受動性といくつかの仮定を設けることで、 q_r もしくは v_r にそれぞれロボティックネットワークが同期することが示されている。

3. ロボット間の通信遅れを考慮したロボティックネットワーク

(6) 式では、近傍の情報である $q_j(t), \xi_j(t)$ が直接利用できることが想定されている。しかしながら、実際の通信は遅れ

Fig. 2 Scattering transformation of communication block between i -th robot and j -th robot. The constant time delay is described by T

を伴う。5章に示すように、この通信遅れはシステムの不安定性を誘発しうる。そこで、文献9), 10)を拡張し、ロボット間の通信遅れを考慮したロボティックネットワークによる協調制御システムを提案する。

3.1 各ロボットの協調制御則

本節では、隣接している i 番目と j 番目のロボットの間に時不変な通信遅れ T が存在する状況を考える。まず、ロボット i が近傍のロボット j から受け取る $q_j(t)$ と $\xi_j(t)$ にそれぞれ対応した信号を $r_{ij}^q(t)$, $r_{ij}^\xi(t)$ に置き換える。このとき (6) 式は、

$$u_{r,i}(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}(r_{ij}^q(t) - q_i(t)) - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} b_{ij}(r_{ij}^\xi(t) - \xi_i(t)) \quad (8a)$$

$$\dot{\xi}_i(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} b_{ij}(r_{ij}^q(t) - q_i(t)) \quad (8b)$$

となる。

(注意) 実際には、ロボット間のみならず、人間とロボティックネットワーク間の通信にも遅れの影響は現れるが、この種の遅れは双方向テレオペレーションの分野において多くの研究が報告されているため、本論文では考えず今後の課題とする。

3.2 スキャタリング変換と通信路の受動性

本節では、文献11)と同様にスキャタリング変換を用いてロボット間の通信路の受動化を行なう。まず、 $r_{ij}(t) := [(r_{ij}^q(t))^T (r_{ij}^\xi(t))^T]^T \in \mathbb{R}^4$ と $x_i(t) := [q_i^T(t) \xi_i^T(t)]^T$ を定義し、 $p_{ij}(t) \in \mathbb{R}^4$ を次式で定義する。

$$p_{ij}(t) := M_{ij}(r_{ij}(t) - x_i(t)), \quad (9)$$

$$M_{ij} := \begin{bmatrix} a_{ij} & -b_{ij} \\ b_{ij} & 0 \end{bmatrix} \otimes I_2$$

ここで、 $\otimes$ はクロネッカー積とする。定義(9)式より(8)式は次式に書き換えられる。

$$\dot{x}_i(t) = p_i(t) + \begin{bmatrix} \delta_i \\ 0 \end{bmatrix} u_h(t), \quad p_i(t) := \sum_{j \in \mathcal{N}_i} p_{ij}(t) \quad (10)$$

つぎに、スキャタリング変数を次式で定義する。

$$s_{ij}^+(t) := \frac{-p_{ij}(t) + \sigma r_{ij}(t)}{\sqrt{2\sigma}}, \quad s_{ij}^-(t) := \frac{-p_{ij}(t) - \sigma r_{ij}(t)}{\sqrt{2\sigma}} \\ s_{ji}^+(t) := \frac{p_{ji}(t) + \sigma r_{ji}(t)}{\sqrt{2\sigma}}, \quad s_{ji}^-(t) := \frac{p_{ji}(t) - \sigma r_{ji}(t)}{\sqrt{2\sigma}} \quad (11)$$

ただし、 $\sigma > 0$ は定数とする。これらのスキャタリング変

数は、Fig. 2 より以下の関係を満たす。

$$s_{ji}^+(t) = s_{ij}^+(t - T), \quad s_{ij}^-(t) = s_{ji}^-(t - T) \quad (12)$$

簡単のため、すべてのスキャタリング変数は $t < 0$ で 0_4 であるとする。ただし、 $0_l \in \mathbb{R}^l$ は 0 をそれぞれ要素にもつベクトルとする。

つづいて、 $s_q := [(\sqrt{\sigma/2})q_r^T \ 0_2^T]^T \in \mathbb{R}^4$, $\bar{r}_{ij}^q(t) := r_{ij}^q(t) - q_r$, $\bar{r}_{ij}(t) := [(\bar{r}_{ij}^q(t))^T (r_{ij}^\xi(t))^T]^T$ と定義する。

ここで、ロボット i, j 間の通信路のエネルギー関数を次式で定義する。

$$S_{ij} := \frac{1}{2} \int_0^t (\|s_{ij}^+(\tau) - s_q\|^2 - \|s_{ij}^+(\tau) - s_q\|^2 \\ + \|s_{ji}^-(\tau) + s_q\|^2 - \|s_{ji}^-(\tau) + s_q\|^2) d\tau + T \|s_q\|^2 \\ = \frac{1}{2} \int_{t-T}^t \|s_{ij}^+(\tau) - s_q\|^2 d\tau + \frac{1}{2} \int_{t-T}^t \|s_{ji}^-(\tau) + s_q\|^2 d\tau \geq 0$$

このとき、つぎの補題を得る¹²⁾。

[補題 2] ロボット i, j 間の通信路とスキャタリング変換(11), (12)を考える。このとき、通信路は $[-p_{ij}^T(t) - p_{ji}^T(t)]^T$ から $[\bar{r}_{ij}^T(t) \ \bar{r}_{ji}^T(t)]^T$ まで S_{ij} に関して受動的である。

つぎに、(11) 式を微分すると、

$$\dot{s}_{ij}^+(t) = \frac{-\dot{p}_{ij}(t) + \sigma \dot{r}_{ij}(t)}{\sqrt{2\sigma}}, \quad \dot{s}_{ij}^-(t) = \frac{-\dot{p}_{ij}(t) - \sigma \dot{r}_{ij}(t)}{\sqrt{2\sigma}} \\ \dot{s}_{ji}^+(t) = \frac{\dot{p}_{ji}(t) + \sigma \dot{r}_{ji}(t)}{\sqrt{2\sigma}}, \quad \dot{s}_{ji}^-(t) = \frac{\dot{p}_{ji}(t) - \sigma \dot{r}_{ji}(t)}{\sqrt{2\sigma}} \quad (13)$$

を得る。また、(12) 式と同様にして次式が成り立つ。

$$\dot{s}_{ji}^+(t) = \dot{s}_{ij}^+(t - T), \quad \dot{s}_{ij}^-(t) = \dot{s}_{ji}^-(t - T) \quad (14)$$

さらに、 $s_v := [(\sqrt{\sigma/2})v_r^T \ 0_2^T]^T \in \mathbb{R}^4$ とし、通信ブロックのエネルギー関数を新たに次式で定義する。

$$\tilde{S}_{ij} := \frac{1}{2} \int_0^t (\|\dot{s}_{ij}^+(\tau) - s_v\|^2 - \|\dot{s}_{ji}^+(\tau) - s_v\|^2 \\ + \|\dot{s}_{ji}^-(\tau) + s_v\|^2 - \|\dot{s}_{ij}^-(\tau) + s_v\|^2) d\tau + T \|s_v\|^2 \geq 0.$$

また、 $\dot{r}_{ij}^q(t) := \dot{r}_{ij}^q(t) - v_r$, $\dot{r}_{ij}(t) := [(\dot{r}_{ij}^q(t))^T (\dot{r}_{ij}^\xi(t))^T]^T$ と定義すると、つぎの補題を得る。

[補題 3] ロボット i, j 間の通信路とスキャタリング変換(11), (12)を考える。このとき、通信路は $[-\dot{p}_{ij}^T(t) - \dot{p}_{ji}^T(t)]^T$ から $[\dot{r}_{ij}^T(t) \ \dot{r}_{ji}^T(t)]^T$ まで $\tilde{S}_{ij}$ に関して受動的である。

(証明) エネルギー関数 $\tilde{S}_{ij}$ のシステム軌道に沿った時間微分を求めると次式となる。

$$\dot{\tilde{S}}_{ij} = \frac{1}{4\sigma} (\|\dot{p}_{ij}(t) + \sigma \dot{r}_{ij}(t)\|^2 - \|\dot{p}_{ji}(t) + \sigma \dot{r}_{ji}(t)\|^2 \\ + \|\dot{p}_{ji}(t) - \sigma \dot{r}_{ji}(t)\|^2 - \|\dot{p}_{ij}(t) - \sigma \dot{r}_{ij}(t)\|^2) \\ = -\dot{p}_{ij}^T(t) \dot{r}_{ij}(t) - \dot{p}_{ji}^T(t) \dot{r}_{ji}(t). \quad (15)$$

よって、上記補題が示された。 $\square$

3.3 ロボティックネットワークの受動性

本節では上記協調制御則とスキャタリング変換から構成

されるロボティックネットワークが有する受動性について考察する．まず，位置制御モードについて考察する．すべてのロボットに関して位置偏差を $\bar{q}_i(t) := q_i(t) - q_r$ と定義し，平均位置偏差を $\bar{z}_q(t) := z_q(t) - q_r$ と定義する．このとき，偏差システムは以下で定式化される．

$$\dot{\bar{q}}_i(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}(\bar{r}_{ij}^q(t) - \bar{q}_i(t)) - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} b_{ij}(\bar{r}_{ij}^\xi(t) - \xi_i(t)) + \delta_i u_h(t) \quad (16)$$

$$\dot{\xi}_i(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} b_{ij}(\bar{r}_{ij}^q(t) - \bar{q}_i(t)) \quad (17)$$

ここで， q_r が定数であることから (16) 式が成り立つ．

このとき，つぎの補題を得る¹²⁾．

[補題 4] すべての (1), (5), (8) 式, $j \in \mathcal{N}_i$ のスキヤッタリング変換 (11), (12) と (7) 式から構成されるシステムは，アクセス可能なロボットの平均位置と目標位置との偏差 $\bar{z}_q(t)$ から人間の速度指令値 $u_h(t)$ までつぎのエネルギー関数に関して受動的である．

$$S_q := \frac{1}{2m} \sum_{i \in \mathcal{V}} (\|\bar{q}_i\|^2 + \|\xi_i\|^2) + \frac{1}{m} \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} S_{ij} \quad (18)$$

つづいて，速度制御モードにおけるシステムの受動性を示す．まず，人間オペレータの入力 $u_h(t)$ の微分可能性を仮定する^(注 1)．つぎに，速度偏差を $\dot{\bar{q}}_i(t) := \dot{q}_i(t) - v_r$ ， $\bar{z}_v(t) := z_v(t) - v_r$ と定義する．さらに，(8) 式を微分することで，

$$\ddot{\bar{q}}_i(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}(\dot{\bar{r}}_{ij}^q(t) - \dot{\bar{q}}_i(t)) - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} b_{ij}(\dot{\bar{r}}_{ij}^\xi(t) - \dot{\xi}_i(t)) + \delta_i \dot{u}_h(t) \quad (19)$$

$$\ddot{\xi}_i(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} b_{ij}(\dot{\bar{r}}_{ij}^q(t) - \dot{\bar{q}}_i(t)) \quad (20)$$

となる．ここで， v_r が定数であることから (19) 式が成立する．

このとき，つぎの補題が成り立つ．

[補題 5] すべての (1), (5), (8) 式, $j \in \mathcal{N}_i$ のスキヤッタリング変換 (11), (12) と (7) 式から構成されるシステムは，アクセス可能なロボットの平均速度と目標速度との偏差 $\bar{z}_v(t)$ から $\dot{u}_h(t)$ までつぎのエネルギー関数に関して受動的である．

$$S_v := \frac{1}{2m} \sum_{i \in \mathcal{V}} (\|\dot{\bar{q}}_i\|^2 + \|\dot{\xi}_i\|^2) + \frac{1}{m} \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} \tilde{S}_{ij} \quad (21)$$

(証明) まず， $\dot{\bar{x}}_i(t) := [\dot{\bar{q}}_i^T(t) \dot{\xi}_i^T(t)]^T$ と定義する．(9), (10) 式から (19), (20) 式は次式で書き換えられる．

$$\ddot{\bar{x}}_i(t) = \dot{p}_i(t) + \begin{bmatrix} \delta_i \\ 0 \end{bmatrix} \dot{u}_h(t). \quad (22)$$

偏差システムのエネルギー関数を以下で定義する．

$$\tilde{S}_i^v := \frac{1}{2} \|\dot{\bar{q}}_i\|^2 + \frac{1}{2} \|\dot{\xi}_i\|^2, \quad i \in \mathcal{V}. \quad (23)$$

(注 1) 文献 9), 10) と同様にして，人間オペレータの速度指令 $u_h(t)$ に適当なフィルタを追加したものを新たな速度指令とすることで，微分可能性を保証することができる．

Fig. 3 The system architecture of position control mode

上記エネルギー関数のシステム軌道に沿った時間微分は次式で与えられる．

$$\begin{aligned} \dot{S}_i^v &= \dot{\bar{x}}_i^T(t) \dot{p}_i(t) + \dot{\bar{q}}_i^T(t) \delta_i \dot{u}_h(t) \\ &= - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \|\dot{\bar{q}}_i(t) - \dot{\bar{r}}_{ij}^q(t)\|^2 + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \dot{\bar{r}}_{ij}^T(t) \dot{p}_{ij}(t) \\ &\quad + \dot{\bar{q}}_i^T(t) \delta_i \dot{u}_h(t) \end{aligned} \quad (24)$$

したがって，補題 3 よりエネルギー関数 S_v のシステム軌道に沿った時間微分は，

$$\begin{aligned} \dot{S}_v &= \frac{1}{m} \sum_{i \in \mathcal{V}} \dot{S}_i^v + \frac{1}{m} \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} \dot{S}_{ij} \\ &= - \frac{1}{m} \sum_{i \in \mathcal{V}} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \|\dot{\bar{q}}_i(t) - \dot{\bar{r}}_{ij}^q(t)\|^2 + \bar{z}_v^T(t) \dot{u}_h(t) \\ &\leq \bar{z}_v^T(t) \dot{u}_h(t) \end{aligned} \quad (25)$$

となる．よって，題意が証明された．□

以上でロボティックネットワークの受動性が示された．

4. 収束性解析

本章では，前章までで構成した位置制御モードと速度制御モードのそれぞれの収束性を考察する．

4.1 人間の目標位置への同期

まず，通信路に遅れのない場合^{9), 10)}と同様に，人間オペレータは自身がもつ位置目標値 q_r と計算機によって計算された平均位置 $z_q(t)$ との偏差をもとに速度指令 $u_h(t)$ を決定するものとする．ここで，この意思決定過程を Φ と表現し，ある関数 f^Φ と h^Φ を用いて次式で表わされるとする．

$$\begin{aligned} \dot{x}_h^\Phi(t) &= f^\Phi(x_h^\Phi(t), q_r - z_q(t)), \\ u_h(t) &= h^\Phi(x_h^\Phi(t), q_r - z_q(t)) \end{aligned} \quad (26)$$

ただし， $x_h^\Phi(t) \in \mathbb{R}^{n_\Phi}$ は状態とする．位置制御モードのブロック線図を Fig. 3 に示す．図中の AVG は平均値計算を表わす．このとき，意思決定過程に以下の仮定を設ける．

[仮定 2]

- 意思決定過程 Φ への入力 $q_r - z_q(t)$ が有界であるとき，状態 $x_h^\Phi(t)$ も有界である．
- (26) 式で表わされる意思決定過程はあるエネルギー関数 S_h^Φ に関して $q_r - z_q(t)$ から $u_h(t)$ まで入力強受動的である．つまり，次式を満たす $S_h^\Phi(x_h^\Phi)$ と $\epsilon > 0$ が存在する．

$$\dot{S}_h^\Phi \leq (q_r - z_q(t))^T u_h(t) - \epsilon \|q_r - z_q(t)\|^2 \quad (27)$$

Fig. 4 The system architecture of velocity control mode

さらに、区間 $[-T, 0]$ から $\mathbb{R}^{4n}$ への連続関数の集合を $\mathcal{C} = \mathcal{C}([-T, 0], \mathbb{R}^{4n})$ と表わす。つぎに、 $\bar{x}_i(t) := [\bar{q}_i^T(t) \xi_i(t)^T]^T$ $i \in \mathcal{V}$ を定義し、 $x_t(\theta) := [\bar{x}_1(t+\theta)^T \cdots \bar{x}_n(t+\theta)^T]^T \in \mathcal{C}$, $\theta \in [-T, 0]$ をシステムの状態として定義する¹³⁾。さらに、 $\bar{x}_i(\theta) = \eta_i(\theta)$ $i \in \mathcal{V}$, $\eta_i \in \mathcal{C}$ であるとする。

このとき、以下の定理を得る¹²⁾。

《定理 1》すべての (1), (5), (8) 式, $j \in \mathcal{N}_i$ のスキヤッタリング変換 (11), (12), (7) 式と意思決定過程 Φ から構成されるシステムを考える。通信構造が仮定 1 を満たし、かつ意思決定過程 Φ が仮定 2 を満たすとする。このとき、(2) 式が成り立ち位置同期が達成される。

(証明) 文献 12, 命題 1) を参照。

4.2 人間の目標速度への同期

つづいて、速度制御モードについて考える。位置制御モードと同様に、人間オペレータは自身がつ目標速度 v_r と平均速度 $z_v(t)$ との偏差をもとに速度指令 $u_h(t)$ を決定するものとする。ここで、この意思決定過程を Ψ と表現し、ある関数 f^Ψ と h^Ψ を用いて次式で表わされるとする。

$$\begin{aligned} \dot{x}_h^\Psi(t) &= f^\Psi(x_h^\Psi(t), v_r - z_v(t)), \\ u_h(t) &= h^\Psi(x_h^\Psi(t), v_r - z_v(t)) \end{aligned} \quad (28)$$

ただし、 $x_h^\Psi(t) \in \mathbb{R}^{n_\Psi}$ は状態とする。速度制御モードのブロック線図を Fig. 4 に示す。また、 Ψ に以下の仮定を設ける。

[仮定 3]

- 意思決定過程 Ψ への入力 $v_r - z_v(t)$ が有界であるとき、状態 $x_h^\Psi(t)$ も有界である。
- (28) 式で表わされる意思決定過程はあるエネルギー関数 S_h^Ψ に関して $v_r - z_v(t)$ から $\dot{u}_h(t)$ まで入力強受動的である。つまり、次式を満たす $S_h^\Phi(x_h^\Psi)$ と $\rho > 0$ が存在する。

$$\dot{S}_h^\Psi \leq (v_r - z_v(t))^T \dot{u}_h(t) - \rho \|v_r - z_v(t)\|^2 \quad (29)$$

ここで位置制御モードと同様に、 $\dot{x}_t(\theta) := [\dot{\bar{x}}_1(t+\theta)^T \cdots \dot{\bar{x}}_n(t+\theta)^T]^T \in \mathcal{C}$ をシステムの状態として定義する。また、 $\dot{\bar{x}}_i(\theta) = \dot{\eta}_i(\theta)$ $i \in \mathcal{V}$, $\dot{\eta}_i \in \mathcal{C}$ であるとする。

このとき、つぎの定理が得られる。

《定理 2》すべての (1), (5), (8) 式, $j \in \mathcal{N}_i$ のスキヤッタリング変換 (11), (12), (7) 式と意思決定過程 Ψ から構成されるシステムを考える。通信構造が仮定 1 を満たし、かつ意思決定過程 Ψ が仮定 3 を満たすとする。このとき、(3) 式が成り立ち速度同期が達成される。

(証明) まず、 $\dot{x}_t$ の定義より (21) 式の S_v は $\dot{x}_t$ の準正定蓄

積汎関数 $S_v : \mathcal{C} \rightarrow \mathbb{R}_+ := [0, \infty)$ となる。ここで、準正定蓄積汎関数 $V_v : \mathcal{C} \times \mathbb{R}^{n_\Psi} \rightarrow \mathbb{R}_+$ を次式で定義する。

$$V_v(\dot{x}_t, x_h^\Psi) := S_v(\dot{x}_t) + S_h^\Psi(x_h^\Psi) \quad (30)$$

(25), (29) 式からこの汎関数の時間微分は、

$$\begin{aligned} \dot{V}_v(\dot{x}_t, x_h^\Psi) &= -\frac{1}{m} \sum_{i \in \mathcal{V}} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \|\dot{q}_i(t) - \dot{r}_{ij}^q(t)\|^2 \\ &\quad + \tilde{z}_v(t)^T \dot{u}_h(t) - \tilde{z}_v(t)^T \dot{u}_h(t) - \rho \|\tilde{z}_v(t)\|^2 \\ &= -\frac{1}{m} \sum_{i \in \mathcal{V}} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \|\dot{q}_i(t) - \dot{r}_{ij}^q(t)\|^2 - \rho \|\tilde{z}_v(t)\|^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (31)$$

となる。 $V_v(\dot{x}_t, x_h^\Psi)$ の定義 (30) と (31) 式より、すべての $\dot{q}_i(t)$, $\dot{\xi}_i(t)$ は有界である。さらに、 $\dot{q}_i(t)$ の有界性と仮定 3 より、 x_h^Ψ も有界である。したがって、時間遅れ系に対する LaSalle の不変性原理¹³⁾, p. 143, 定理 3.1) が適用可能であり、解 $\dot{x}_t$ は $\dot{V}_v(\dot{x}_t, x_h^\Psi) \equiv 0$ を満たす最大不変集合に収束する。いま、(31) 式より $\dot{V}_v \equiv 0$ は $\dot{r}_{ij}^q \equiv \dot{q}_i$ ($i, j \in \mathcal{E}$) かつ $\tilde{z}_v \equiv 0$ を意味する。つまり、次式が成り立つ。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\dot{r}_{ij}^q(t) - \dot{q}_i(t)) = 0 \quad (i, j) \in \mathcal{E} \quad (32)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{z}_v(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{i \in \mathcal{V}_h} \dot{q}_i(t) = 0 \quad (33)$$

したがって、(20) 式より、 $\dot{\xi}_i(t) \forall i \in \mathcal{V}$ がそれぞれ定数に収束することがいえる。また、(13), (14) 式より、

$$\begin{aligned} \dot{r}_{ij}^q(t) &= \dot{r}_{ji}^q(t-T) + \frac{1}{\sigma} \{b_{ij}(\dot{r}_{ij}^\xi(t) - \dot{\xi}_i(t)) \\ &\quad + b_{ji}(\dot{r}_{ji}^\xi(t-T) - \dot{\xi}_j(t-T))\} - a_{ij}e_{ij}(t) \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \dot{r}_{ji}^q(t) &= \dot{r}_{ij}^q(t-T) + \frac{1}{\sigma} \{b_{ji}(\dot{r}_{ji}^\xi(t) - \dot{\xi}_j(t)) \\ &\quad + b_{ij}(\dot{r}_{ij}^\xi(t-T) - \dot{\xi}_i(t-T))\} - a_{ji}e_{ji}(t) \end{aligned} \quad (35)$$

$$\dot{r}_{ij}^\xi(t) = \dot{r}_{ji}^\xi(t-T) - b_{ij}e_{ij}(t) \quad (36)$$

$$\dot{r}_{ji}^\xi(t) = \dot{r}_{ij}^\xi(t-T) - b_{ji}e_{ji}(t) \quad (37)$$

を得る。ただし、 $e_{ij}(t)$, $e_{ji}(t)$ はそれぞれ次式で定義する。

$$e_{ij}(t) := \frac{1}{\sigma} \{(\dot{r}_{ij}^q(t) - \dot{q}_i(t)) + (\dot{r}_{ji}^q(t-T) - \dot{q}_j(t-T))\}$$

$$e_{ji}(t) := \frac{1}{\sigma} \{(\dot{r}_{ji}^q(t) - \dot{q}_j(t)) + (\dot{r}_{ij}^q(t-T) - \dot{q}_i(t-T))\}$$

ここで、(32) 式より、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_{ij}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} e_{ji}(t) = 0 \quad (38)$$

が成り立つ。したがって、(36), (37) 式より、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\dot{r}_{ij}^\xi(t) - \dot{r}_{ji}^\xi(t-T)) = \lim_{t \rightarrow \infty} (\dot{r}_{ji}^\xi(t) - \dot{r}_{ij}^\xi(t-T)) = 0$$

が成り立つ。よって、次式が成り立つ。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\dot{r}_{ij}^\xi(t) - \dot{r}_{ij}^\xi(t-2T)) = 0 \quad (39)$$

つぎに、(34) 式から時刻 $t-T$ における (35) 式を引くと、

$$\dot{r}_{ij}^q(t) + \dot{r}_{ij}^q(t-2T) = 2\dot{r}_{ji}^q(t-T) + \frac{b_{ij}}{\sigma} \{(\dot{r}_{ij}^\xi(t) - \dot{\xi}_i(t))$$

Fig. 5 Communication graph in (left) the simulation and (right) the experiment

$$\begin{aligned} & -(\dot{r}_{ij}^{\xi}(t-2T) - \dot{\xi}_i(t-2T)) \\ & -a_{ij}e_{ij}(t) + a_{ji}e_{ji}(t-T) \end{aligned} \quad (40)$$

を得る。したがって、(38)~(40) 式と $\dot{\xi}_i$ が定数に収束することから、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \{\dot{r}_{ij}^q(t) + \dot{r}_{ij}^q(t-2T) - 2\dot{r}_{ji}^q(t-T)\} = 0 \quad (41)$$

が成り立つ。これはほかの近傍のロボット $k \in \mathcal{N}_i$ との間においても成り立つ。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \{\dot{r}_{ik}^q(t) + \dot{r}_{ik}^q(t-2T) - 2\dot{r}_{ki}^q(t-T)\} = 0 \quad (42)$$

ここで、(32) 式は $\lim_{t \rightarrow \infty} (\dot{r}_{ij}^q(t) - \dot{r}_{ik}^q(t)) = 0$ を意味するので、(41), (42) 式より、 $\lim_{t \rightarrow \infty} (\dot{r}_{ji}^q(t) - \dot{r}_{ki}^q(t)) = 0$ を得る。したがって、 $\lim_{t \rightarrow \infty} (\dot{q}_j(t) - \dot{q}_k(t)) = 0$ が成り立ち、これは仮定 1 よりすべてのロボット間において成り立つ。よって、(33) 式より $\lim_{t \rightarrow \infty} (\dot{q}_i(t) - v_r) = 0 \forall i \in \mathcal{V}$ がいえ、(3) 式が満たされることが証明された。□

(注意) 本論文において、(2), (3) 式の達成には (8b) 式の積分動作は必要ではない。しかしその場合、文献 9), 10) において課した目的 (4) 式を達成することはできない。(8b) 式の積分動作がない場合、 $\dot{\hat{q}}_i(t) = \dot{q}_i(t) - v_r$ より (19) 式は、

$$\dot{\hat{q}}_i(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}(\dot{r}_{ij}^q(t) - \dot{q}_i(t)) + \delta_i u_h(t) - v_r \quad (43)$$

となる。一部のロボットが人間オペレータからの入力 $u_h(t)$ を受信しない場合、(43) 式より $\lim_{t \rightarrow \infty} (\dot{q}_i(t) - v_r) = 0 \forall i \in \mathcal{V}$ となると同時に $\lim_{t \rightarrow \infty} (\dot{r}_{ij}^q(t) - \dot{q}_i(t)) = 0 \forall i \in \mathcal{V}, j \in \mathcal{N}_i$ が達成されることはない。これは (4) 式は達成され得ないことを意味している。本論文では、理論的に証明するには至っていないが、(4) 式の達成を期待して積分動作を加えている。その効果を 5 章のシミュレーションにより検証する。

(注意) 文献 14) では、(6) 式の制御器で時間遅れがなく、すべての通信を行なうロボット間で重み a_{ij}, b_{ij} を同じ値とした場合において状態が同期する速度について議論している。ロボット間に時間遅れがある本研究における重み a_{ij}, b_{ij} と過渡特性の関係に関する解析は今後の課題とする。

(注意) 文献 15) では、通信の重みを最適化する設計手法を提案している。しかし、本論文 5, 6 章で使用している重みは経験的に得られたものであり、系統的な重みの設計手法に関しては今後の課題とする。

5. シミュレーション

本章では、定理 1, 2 の妥当性をシミュレーションによって

Fig. 6 Time responses of the all positions q_i under time delay without scattering transformation

Fig. 7 Time responses of the all positions q_i under time delay with scattering transformation

検証する。6 台のロボットを想定し、通信構造は **Fig. 5** 左に示したものをを用いる。アクセス可能なロボットを $\mathcal{V}_h = \{1, 5\}$ とする。ここでは、定理の検証を目的とするため実際の人間オペレータに操作をさせる代わりに、先行研究 9), 10) と同様の手法によって同定した人間オペレータの意思決定過程のモデルを使用する。使用するモデルはそれぞれ仮定 2, 3 を満たす。下記シミュレーションでは、 x, y 両方向に同じ意思決定過程のモデルを用いる。

まず、時間遅れがある状況で、スキヤットリング変換を行なわないシステムが不安定になることを示す。位置制御モードにおいて、(8) 式で $r_{ij}^q(t) = q_j(t-T)$, $r_{ij}^{\xi}(t) = \xi_j(t-T)$ とする。それぞれのロボット間の通信遅れは 0.7 s と設定する。パラメータはそれぞれ $a_{ij} = 1, b_{ij} = 1 (i, j) \in \mathcal{E}$ とし、 $\sigma = 1.0$ と設定した。人間の意思決定過程 Φ として、以下の同定された伝達関数を使用する。

$$\Phi(s) = \frac{0.090(s + 18.07)(s + 2.10)}{s^2 + 2.63s + 3.06} \quad (44)$$

このシステムは仮定 2 を満たす。目標位置は $q_r = [2.52 \ 1.55]^T \text{m}$ と設定する。**Fig. 6** に示すとおり、システムが不安定になっていることがわかる。

つづいて、提案した位置制御モードの制御系を適用する。設定は上記と同様のものをを用い、結果を **Fig. 7** に示す。図より、すべてのロボットが黒点線で示された目標位置に収束していることがわかる。よって、定理 1 の妥当性が示された。

つぎに、速度制御モードの検証を行なう。人間の意思決定過程 Ψ として、以下の同定された伝達関数を使用する。

$$\Psi(s) = \frac{0.092(s^2 + 18.63s + 90.42)}{s(s^2 + 4.12s + 7.09)} \quad (45)$$

このシステムは仮定 3 を満たす。目標速度は $v_r = [0.3 \ -0.1]^T \text{m/s}$ と設定する。結果を **Fig. 8** に示す。図より、すべてのロボットの速度が黒点線で示された目標速度に収束して

Fig. 8 Time responses of the all velocities $\dot{q}_i$ under time delay with scattering transformation

Fig. 9 Time responses of the all positions q_i

Fig. 10 Experiment system

いることがわかる。したがって、定理2の妥当性が示された。

最後に、速度制御モードにおけるロボットの位置の軌跡を Fig. 9 に示す。速度同期の達成と同時に、すべてのロボットの位置が同期していることがわかる。これは、各ロボットがもつ制御器の (8b) 式の積分動作により達成されている。

6. 全方向移動ロボット群を用いた実験

本章では、実際に人間がロボティックネットワークを制御する Fig. 10 に示す実験システムを構築し、提案手法の有効性を検証する。同様の実験システムによって速度制御モードも検証可能であるが、ここでは位置制御モードのみを検証する。まず、天井に設置されたカメラから得られる画像情報より、各ロボットに取り付けた板の色を検出することで各位置を取得する。カメラは Point Grey の Firefly MV を、ロボットは土佐電子の TDO48 を使用する。アクセス可能なロボットの平均位置を C++ で作成した GUI によりディスプレイに表示する。ここでは目標値 q_r を GUI 上に表示し、人間オペレータに与えることとする。人間オペレータはその情報に基づいて速度指令を決定し、マウスによって入力をする。Fig. 11 に、人間に示される GUI のようすを示す。得られた位置情報とオペレータからの入力を dSPACE に渡し、提案した協調制御則を実装する。本論文の提案手法は、各ロボット上のプロセッサで分散的に計算可能だが、ここでは 1 台の

Fig. 11 Graphical user interface

Fig. 12 Time responses of the all positions q_i

コンピュータ上で制御則を擬似的に実装する。ロボット間の通信遅れに関しても、ロボット間の情報交換に擬似的に生じさせた。通信遅れは 0.7s とした。最後に、計算された速度入力を実現するための各モータの回転速度を求め、Bluetooth によって各ロボットに送信する。

前章のシミュレーションと同様に 6 台のロボットを用い、通信構造は Fig. 5 右に示すものを用いる。アクセス可能なロボットは $\mathcal{V}_h = \{2, 4, 6\}$ とする。パラメータはそれぞれ、 $a_{ij} = 0.20, b_{ij} = 0.05 (i, j) \in \mathcal{E}$ と設定した。また、目標位置は、時刻 0~150s で $q_r = [0.69 \ 1.55]^T$ m, 時刻 150~300s で $q_r = [2.52 \ 1.55]^T$ m, 時刻 300~450s で $q_r = [1.37 \ 0.84]^T$ m とした。それ以外のパラメータと設定はシミュレーションと同様のものを使用した。ロボットの位置が同期した後の衝突を回避するために、実際の位置に $d_i \ i \in \mathcal{V}$ を足したものを交換する。それぞれの d_i は $d_1 = [-0.36 \ -0.25]^T$, $d_2 = [0.0 \ -0.50]^T$, $d_3 = [0.36 \ -0.25]^T$, $d_4 = [0.36 \ 0.25]^T$, $d_5 = [0.0 \ 0.50]^T$, $d_6 = [-0.36 \ 0.25]^T$ とする。各 d_i を足した位置 $q_i + d_i$ が目標位置に同期した際、各ロボットは Fig. 5 右に示す正六角形の形をとる。各ロボットの位置の時間応答を Fig. 12 に示す。目標値付近でロボットが小刻みに動き続けているが、これはタイヤと地面との摩擦により小さな入力ではロボットが動かないことが原因である。摩擦により生じた位置の偏差が制御則の積分操作により蓄積され、再び動き出すことが繰り返されることで生じた挙動である。このような違いはあるが、Fig. 12 より、実験でも目標位置 q_r にすべてのロボットが同期していることがわかる。

7. おわりに

本論文では、ロボット間の通信に遅れが存在する状況において、ロボティックネットワークの位置もしくは速度を、人間オペレータの所望する値に同期させる協調制御則を提案した。まず、各ロボットと提案する協調制御則の結合システムが受動的であることを示した。さらに、各ロボット間の通信路に

スキャタリング変換を用いることで、ロボティクネットワーク全体が受動性を有することを示した。また、人間オペレータの意思決定過程に入力強受動性の仮定を設けることで、各ロボットの位置および速度がそれぞれ人間の目標値へ同期することを示した。最後に、シミュレーションと実験を行い、提案法の有効性を確認した。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 15H04019 の助成を受けたものであり、ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) M. Dunbabin and L. Marques: Robotics for Environmental Monitoring: Significant Advancements and Applications, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, **19**-1, 24/39 (2012)
- 2) N.E. Leonard, D.A. Paley, F. Lekien, R. Sepulchre, D.M. Frantantoni and R.E. Davis: Collective Motion, Sensor Networks, and Ocean Sampling, *Proc. IEEE*, **95**-1, 48/74 (2007)
- 3) A. Pierson, A. Ataei, I.C. Paschalidis and M. Schwager: Cooperative Multi-Quadrotor Pursuit of an Evader in an Environment with No-Fly Zones, *Proc. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 320/326 (2016)
- 4) 東, 永原, 石井, 林, 桜間, 畑中: マルチエージェントシステムの制御, システム制御工学シリーズ 22, コロナ社 (2015)
- 5) 桜間, 安木, 西田: 分散最適化に基づくロボット群による複数極値探索, システム制御情報学会論文誌, **29**-4, 155/161 (2016)
- 6) 佐藤, 田中: 簡単な構造によるマルチロボットのフォーメーション制御, 計測自動制御学会論文集, **50**-2, 125/131 (2014)
- 7) M. Egerstedt, J.-P. de la Croix, H. Kawashima and P. Kingston: Interacting with Networks of Mobile Agents, *Large-Scale Networks in Engineering and Life Sciences*, 199/224, Springer-Verlag (2014)
- 8) T. Hatanaka, N. Chopra, M. Fujita and M.W. Spong: *Passivity-based Control and Estimation in Networked Robotics*, Communications and Control Engineering Series, Springer-Verlag (2015)
- 9) T. Hatanaka, N. Chopra and M. Fujita: Passivity-based Bilateral Human-Swarm-Interactions for Cooperative Robotic Networks and Human Passivity Analysis, *Proc. 54th IEEE Conference on Decision and Control*, 1033/1039 (2015)
- 10) T. Hatanaka, N. Chopra, J. Yamauchi and M. Fujita: A Passivity-Based Approach to Human-Swarm Collaborations and Passivity Analysis of Human Operators, Y. Wang and F. Zhang (Eds.), *Trends in Control and Decision-Making for Human-Robot Collaboration Systems*, 325/355, Springer-Verlag (2017)
- 11) N. Chopra and M.W. Spong: Output Synchronization of Nonlinear Systems with Time Delay in Communication, *Proc. 45th IEEE Conference on Decision and Control*, 4986/4992 (2006)
- 12) J. Yamauchi, T. Hatanaka, N. Chopra and M. Fujita: Passivity-Based Control of Human-Robotic Networks with Inter-Robot Communication Delays and Experimental Verification, *Proc. International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 628/633 (2017)
- 13) J.K. Hale and S.M.V. Lunel: *Introduction to Functional Differential Equations*, Applied Mathematical Sciences Series, **99**, Springer-Verlag, New York (1993)
- 14) K.M. Lynch, I.B. Schwartz, P. Yang and R.A. Freeman: Decentralized Environmental Modeling by Mobile Sensor

Networks, *Trans. Robotics*, **24**-3, 710/724 (2008)

- 15) X. Wu, F. Dorfler and M.R. Jovanovic: Topology Identification and Design of Distributed Integral Action in Power Networks, *Proc. 2016 American Control Conference*, 5921/5926 (2016)

[著 者 紹 介]

山 内 淳 矢 (学生会員)

2013 年名古屋大学工学部機械・航空工学科電子機械コース修了。2015 年東京工業大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。同年同大学大学院理工学研究科博士後期課程入学, 現在に至る。視覚フィードバックに基づく制御/推定, 人間とロボティクネットワークの協調制御の研究に従事。2015 年 10th Asian Control Conference Best Paper Prize Award 受賞。IEEE CSS の会員。

Made Widhi Surya ATMAN (学生会員)

He received B.Eng. degree in Electrical Engineering from Institut Teknologi Bandung, Indonesia in 2011 and M.Eng degree from Tokyo Institute of Technology in 2017. He is currently a Ph.D. student at Tokyo Institute of Technology. His current research interests include human-robotic network and passivity-based control.

畑 中 健 志 (正会員)

2007 年京都大学大学院博士後期課程修了。同年より東京工業大学助教, 2015 年より同准教授となり現在に至る。分散エネルギー管理システムおよびネットワーク化ロボティクスの研究に従事。Passivity-Based Control and Estimation in Networked Robotics (Springer) およびマルチエージェントシステムの制御 (コロナ社) の著者。博士 (情報学)。2017 年 SICE 制御部門木村賞, 2014 年同パイオニア賞, 2016 年 SICE 著述賞, 2009, 2015 年同論文賞, 2015 Asian Control Conference Best Paper Prize Award などを受賞。IEEE TCST, SICE JCMSI, SICE 論文集の Associate Editor。IEEE CSS Conference Editorial Board Member。

藤 田 政 之 (正会員・フェロー)

1984 年早稲田大学大学院博士前期課程修了。85 年同後期課程中退。同年以降, 金沢大学, 北陸先端科学技術大学院大学を経て 2005 年東京工業大学教授。2012 年 JST CREST 研究総括。IEEE CSS Vice President, 同 Board of Governor, 同 MSC General Chair, 同 CDC Plenary Lecturer, 同 Distinguished Lecturer, SICE 理事, 同制御部門長, IEEE TAC, IEEE TCST, IFAC Automatica の Associate Editor, SICE JCMSI Editor などを歴任。IEEE TCST Outstanding Paper Award, SICE 教育貢献賞, 同論文賞などを受賞。受動性に基づく協調制御, ロバスト制御などの研究に従事。IEEE フェロー。工学博士。