

# 冗長マニピュレータの動的形状変更可操作性 —7リンク冗長マニピュレータ (PA10) の評価—

見 浪 護<sup>\*1</sup> 小 林 洋 祐<sup>\*1</sup> 松 野 隆 幸<sup>\*1</sup> 矢 納 陽<sup>\*2</sup>

## Dynamic Reconfiguration Manipulability for Redundant Manipulators — Evaluation of 7-link Redundant Manipulator—PA10—

Mamoru Minami<sup>\*1</sup>, Yosuke Kobayashi<sup>\*1</sup>, Takayuki Matsuno<sup>\*1</sup> and Akira Yanou<sup>\*2</sup>

In this research, a new concept named Dynamic Reconfiguration Manipulability (DRM) is proposed, gauging dynamical shape-changeability by using redundancy while a hand task is given primarily. Helping optimize designing and controlling robots, the DRM represents simultaneously how much acceleration each intermediate link can be generated and what direction the acceleration can be realized by normalized torque inputs. We have confirmed appropriateness and usefulness of the DRM by applying it to redundant manipulator PA10 produced by Mitsubishi Heavy Industries Ltd.

**Key Words:** Dynamic Reconfiguration Manipulability, Redundant Manipulator, Shape-Changeability

### 1. 緒 言

ロボットに関する理論の一つとして、マニピュレータの設計や、ある作業を実行する際のマニピュレータの位置・姿勢を決定するために、手先をどの程度自由に操作できるかを表す指標に関して1980年代半ばから1990年代初頭にかけて運動学的な観点ならびに動力学的な観点から数多くの研究がされてきた。外部から手先に加えらる力と加速度の関係を表した一般化慣性だ円体[1]が提案され、続いて、マニピュレータの運動学的な観点からヤコビ行列の性質を用いて関節角速度と手先速度の関係を示した可操作性[2]、静的な力と関節トルクの関係を表した操作力だ円体、動力学的な観点も含めてマニピュレータの運動方程式による制約を考慮した関節トルクと手先加速度の関係を示した動的可操作性[3]~[5]などの概念が提案された。これらの操作性の良し悪しは、特異姿勢からの距離を表す指標やデカルト空間の様々な方向に対する動きやすさをだ円体として評価された。近年でも、手先の負荷重量を考慮することで動的可操作性だ円体と操作力だ円体を統一的に表したインピーダンスマッチングだ円体[6]や可操作性指標の二関節を有するロボットへ

の応用[7]、歩行ロボットにおいてもZMP可操作性[8]が提案されており、ロボットの運動を数値的に理解し、制御に活用するための可操作性指標に関する議論は継続的に展開されている。

一方、冗長マニピュレータにおいては優先順位を割り当てた複数のタスクを同時に実行できる優位性が、吉川によって示されている[9][10]。特に、マニピュレータ手先作業中の冗長自由度による中間リンクの操作性に関しては、先行研究として運動学的な観点から冗長マニピュレータの回避可操作性[11][12]が提案され、障害物回避や特異姿勢回避に有効性があることが確認された。しかし、冗長マニピュレータのように多自由度であれば自重も増し、機構の詳細設計や高速・高精度な制御を考える際には、運動学的な観点のみに基づく概念が有効でなくなる場合がある。

そこで本研究では、動力学的な観点も含めた上での冗長性の利用により実現可能な形状変更能力を示した概念「動的形状変更可操作性 (Dynamic Reconfiguration Manipulability, 以下 DRM)」を提案し、ロボットの最適設計や姿勢最適化のために運動性能の一つの評価指標を与えた[13][14]。しかし、これらの研究は4リンクマニピュレータの垂直平面内の運動の解析であり、実際の工業用ロボットの解析に関してどの程度有効であるかについては未解決であった。そこで、本論文では、まず提案する DRM の物理的性質の確認、妥当性や有用性を冗長マニピュレータ PA10 を使用した数値シミュレーションによって検証する。

原稿受付 2015年5月7日

<sup>\*1</sup>岡山大学大学院自然科学研究科

<sup>\*2</sup>川崎医療短期大学放射線技術科

<sup>\*1</sup>Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University

<sup>\*2</sup>Kawasaki College of Allied Health Professions, Department of Radiological Technology

■ 本論文は有用性 (システム設計・構築分野) で評価されました。

## 2. 動的形状変更可操作性

本章ではマニピュレータの操作性について議論する。リンク動的可操作性は動的可操作性をマニピュレータの各リンク先端に適用した概念であり、ほかにタスクが与えられていない状態のマニピュレータの動かしやすさを表す。動的形状変更可操作性は動的可操作性と形状変更可操作性をヒントにした概念であり、手先タスクが与えられている状態での中間リンクの動かしやすさを表す。また、本論文では手先タスクとは時系列で表現される手先の位置・姿勢の目標位置、目標速度、目標加速度のいずれかまたはそれらの組み合わせを指す。

### 2.1 リンク動的可操作性

リンク動的可操作性は、動的可操作性 [3] を各リンク先端に定義した概念であり、関節トルクによってあるリンクの先端がどの方向にどれだけ加速度を出せるのかを表す。これは、本報で述べる DRM の基礎となっているため以下に概説する。

マニピュレータの運動方程式は一般的に

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) + D\dot{q} = \tau \quad (1)$$

で表される。ここで、 $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  は慣性行列、 $h(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^n$  は遠心力、コリオリ力を表す項、 $g(q) \in \mathbb{R}^n$  は重力を表す項、 $D = \text{diag}[d_1, d_2, \dots, d_n]$  は粘性抵抗行列であり、 $\tau \in \mathbb{R}^n$  はトルクベクトル、 $q \in \mathbb{R}^n$  は関節角度である。一方、第  $i$  リンク先端の位置  $r_i \in \mathbb{R}^m$  と関節角度  $q$  の関係は次式で表される。

$$r_i = f_i(q) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式 (2) を時間  $t$  で微分すると、第  $i$  リンク先端の速度  $\dot{r}_i$  と角速度  $\dot{q}$  の関係が次式のように表される。

$$\dot{r}_i = J_i(q)\dot{q} \quad (3)$$

ここで、 $J_i(q) \in \mathbb{R}^{m \times n}$  は  $\dot{r}_i$  の  $q$  に関するヤコビ行列であり、 $i \neq n$  の場合は 0 の成分を含んだ行列  $J_i = [\tilde{J}_i, 0]$ 、 $\tilde{J}_i \in \mathbb{R}^{m \times i}$  として表される。さらに式 (3) を時間  $t$  で微分することで、

$$\ddot{r}_i = J_i(q)\ddot{q} + \dot{J}_i(q)\dot{q} \quad (4)$$

が得られる。ここで、式 (1)、(4) より  $\ddot{q}$  を消去すると、

$$\ddot{r}_i - \dot{J}_i\dot{q} = J_i M^{-1}[\tau - h(q, \dot{q}) - g(q) - D\dot{q}] \quad (5)$$

が得られる。さらに、

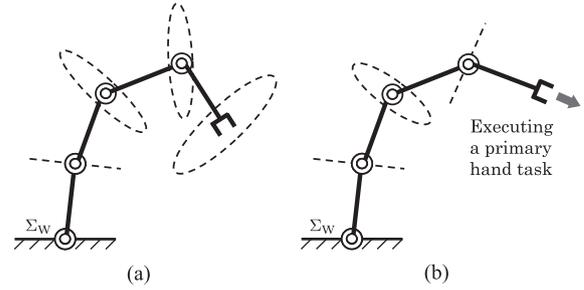
$$\tilde{\tau} \triangleq \tau - h(q, \dot{q}) - g(q) - D\dot{q} \quad (6)$$

$$\ddot{\tilde{r}}_i \triangleq \ddot{r}_i - \dot{J}_i\dot{q} \quad (7)$$

によって新たな変数  $\tilde{\tau}$  と  $\ddot{\tilde{r}}_i$  を導入すると式 (5) は次式のように表せる。

$$\ddot{\tilde{r}}_i = J_i M^{-1} \tilde{\tau} \quad (8)$$

リンク動的可操作性は式 (8) を基礎式として、動力的な制約下での関節トルク  $\tilde{\tau}$  によって各リンク先端加速度  $\ddot{\tilde{r}}_i$  の出しやすさの度合いを定量化し指標とする、という考え方である。こ



**Fig. 1** (a) Dynamic manipulability ellipsoids (DMEs) represent the possible accelerations  $\ddot{r}_i$  for each link with no prior task and (b) dynamic reconfiguration manipulability ellipsoids (DRMEs) represent the possible accelerations  $\Delta^1 \ddot{r}_j$  for intermediate links during the system executing primary task

こで、 $\tilde{\tau}$  の一般解を求めると、

$$\tilde{\tau} = (J_i M^{-1})^+ \ddot{\tilde{r}}_i + [I_n - (J_i M^{-1})^+ (J_i M^{-1})] k \quad (9)$$

ただし、 $(J_i M^{-1})^+$  は  $(J_i M^{-1})$  の擬似逆行列、 $I_n \in \mathbb{R}^{n \times n}$  は単位行列、 $k \in \mathbb{R}^n$  は任意ベクトルである。

ここで、 $\tilde{\tau}$  に対する制約として  $|\tilde{\tau}_i| \leq \tilde{\tau}_i^{\text{lim}}$  を考える場合、変換行列  $L_D = \text{diag}[\tilde{\tau}_1^{\text{lim}}, \tilde{\tau}_2^{\text{lim}}, \dots, \tilde{\tau}_n^{\text{lim}}]$  によって正規化されたトルク  $\hat{\tau}$  と変換された行列  $\hat{M}$  は

$$\hat{\tau} = L_D^{-1} \tilde{\tau} \quad (10)$$

$$\hat{M} = L_D^{-1} M \quad (11)$$

によって表される。 $\tilde{\tau}_i^{\text{lim}}$  の決定法については、ロボットの静止状態や動作状態に対してダイナミクスの影響をあらかじめ考慮して決定することができる [3]。ここで、 $\|\hat{\tau}\|$  が  $\|\hat{\tau}\| \leq 1$  を満足するような関節トルク  $\hat{\tau}$  を用いて実現し得る各リンクの先端加速度  $\ddot{\tilde{r}}_i$  のすべてからなる集合を考えると、それは式 (12) で表され、 $J_i \hat{M}^{-1}$  の値域空間の次元を持つユークリッド空間内の円体 (Fig. 1 (a)) となる。

$$\ddot{\tilde{r}}_i^T \left[ J_i \left( M^T L_D^{-2} M \right)^{-1} J_i^T \right]^+ \ddot{\tilde{r}}_i \leq 1, \quad \text{and } \ddot{\tilde{r}}_i \in \mathbb{R}(J_i \hat{M}^{-1}) \quad (12)$$

### 2.2 動的形状変更可操作性

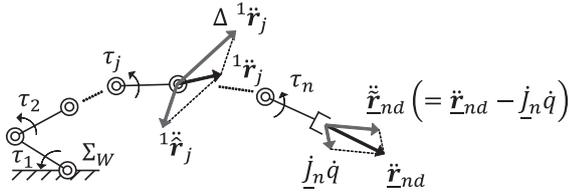
マニピュレータのハンドにタスクが与えられた場合 ( $i = n$ ) の形状変更能力の良し悪しを考える。 $\ddot{\tilde{r}}_n$  と  $\tilde{\tau}$  の関係は式 (8) より次式のように表される。

$$\ddot{\tilde{r}}_n = J_n M^{-1} \tilde{\tau} \quad (13)$$

ここで、位置・姿勢空間の  $m$  次元空間から手先に与える作業空間の  $s$  次元 ( $s = 1, 2, \dots, m$ ) を任意に選択する行列  $\underline{U}_s \in \mathbb{R}^{s \times m}$  を用いると以下の関係が得られる。

$$\ddot{\tilde{r}}_n = \underline{U}_s \ddot{\tilde{r}}_n \quad (14)$$

$$\underline{J}_n = \underline{U}_s J_n \quad (15)$$



**Fig. 2** Reconfiguration of intermediate link during hand executing task  $\ddot{\mathbf{r}}_{nd}$ .  $\mathbf{J}_j \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ \ddot{\mathbf{r}}_{nd}$  is a induced acceleration of  $j$ -th link by  $\ddot{\mathbf{r}}_{nd}$

ただし,  $\ddot{\mathbf{r}}_n \in \mathbb{R}^s$ ,  $\mathbf{J}_n \in \mathbb{R}^{s \times n}$  である.  $\mathbf{U}_s$  は, 例えば位置・姿勢空間 ( $m = 6$ ) の中から  $\ddot{\mathbf{r}}_n = [a_x, a_y, \alpha_y]^T$  ( $s = 3$ ) のように加速度 2 変数・角加速度 1 変数が与えられる場合, 次のように表される.

$$\mathbf{U}_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

任意の  $s$  次元の手先タスクを考えるとき, 式 (13) は以下のように表せる.

$$\ddot{\mathbf{r}}_n = \mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1} \ddot{\boldsymbol{\tau}} \quad (17)$$

ハンド目標加速度  $\ddot{\mathbf{r}}_{nd}$  が優先タスクとして与えられる場合, 式 (7), (14), (15) より得られる  $\ddot{\mathbf{r}}_{nd} = \ddot{\mathbf{r}}_{nd} - \dot{\mathbf{J}}_n \dot{\mathbf{q}}$  の関係を通して  $\ddot{\mathbf{r}}_{nd}$  を実現すればよい.  $\ddot{\mathbf{r}}_{nd}$  を実現するための  $\ddot{\boldsymbol{\tau}}$  は式 (17) の一般解を求めることによって得られる.

$$\ddot{\boldsymbol{\tau}} = (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ \ddot{\mathbf{r}}_{nd} + [\mathbf{I}_n - (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})] \mathbf{l} \quad (18)$$

$\mathbf{l} \in \mathbb{R}^n$  は任意ベクトルであり,  $[\mathbf{I}_n - (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})]$  の単位は無次元であることから  $\mathbf{l}$  の単位は関節トルクと一致する. 式 (18) の右辺第 1 項は  $\ddot{\mathbf{r}}_{nd}$  を実現する  $\ddot{\boldsymbol{\tau}}$  の中で  $\|\ddot{\boldsymbol{\tau}}\|$  を最小にする解を与える. また第 2 項は, 第 1 項による  $\ddot{\mathbf{r}}_{nd}$  の実現には無関係にマニピュレータの形状を変更する関節トルクを  $\mathbf{l}$  によって与えることを表す.

以下では形状変更のための第  $j$  リンク ( $1 \leq j \leq n-1$ ), すなわち中間リンクの動的形状変更可操作性について考える. ハンド目標タスクの次に優先するタスクを第一動的形状変更タスクと呼び, その優先順位を左肩添え字の“1”で表す. 冗長自由度が多い場合には, 第 2, 第 3 の複数の動的形状変更タスクを実行できる可能性がある. ここで, ハンド目標加速度成分  $\ddot{\mathbf{r}}_{nd}$  を実現している際の第  $j$  リンク加速度成分  ${}^1\ddot{\mathbf{r}}_j$  との関係は, 式 (8) と式 (18) によって次式のように表される.

$$\begin{aligned} {}^1\ddot{\mathbf{r}}_j &= \mathbf{J}_j \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ \ddot{\mathbf{r}}_{nd} \\ &+ \mathbf{J}_j \mathbf{M}^{-1} [\mathbf{I}_n - (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})] \mathbf{l} \end{aligned} \quad (19)$$

さらに式 (7) の関係により式 (19) は次式のように書き直すことができる.

$$\begin{aligned} {}^1\ddot{\mathbf{r}}_j &= \dot{\mathbf{J}}_j \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{J}_j \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ (\ddot{\mathbf{r}}_{nd} - \dot{\mathbf{J}}_n \dot{\mathbf{q}}) \\ &= \mathbf{J}_j \mathbf{M}^{-1} [\mathbf{I}_n - (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})] \mathbf{l} \end{aligned} \quad (20)$$

ここで,

$${}^1\ddot{\mathbf{r}}_j \triangleq \dot{\mathbf{J}}_j \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}_j \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ (\ddot{\mathbf{r}}_{nd} - \dot{\mathbf{J}}_n \dot{\mathbf{q}}) \quad (21)$$

$$\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_j \triangleq {}^1\ddot{\mathbf{r}}_j - {}^1\ddot{\mathbf{r}}_j \quad (22)$$

$${}^1\mathbf{\Lambda}_j \triangleq \mathbf{J}_j \mathbf{M}^{-1} [\mathbf{I}_n - (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})] \quad (23)$$

によって新たな変数を定義することで, 式 (20) は次式のように表せる.

$$\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_j = {}^1\mathbf{\Lambda}_j \mathbf{l} \quad (24)$$

式 (21), 式 (22) の関係を **Fig. 2** に示す. 式 (21) 中の  ${}^1\ddot{\mathbf{r}}_j$  はマニピュレータの形状変化が原因となり発生する加速度成分を表しており, 右辺第 1 項は第  $j$  リンクに発生する遠心・コリオリ加速度であり, 右辺第 2 項は手先目標タスク達成に伴い第  $j$  リンクに発生する加速度である.  ${}^1\ddot{\mathbf{r}}_j$  に対して加速度  ${}^1\ddot{\mathbf{r}}_j$  を実現するには,  $\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_j$  を入力トルクの一部である  $\mathbf{l}$  によって発生させる必要がある. ここで, 動的形状変更可操作性 (Dynamic Reconfiguration Manipulability, DRM) は, 式 (24) を基礎式として, 目標手先加速度  $\ddot{\mathbf{r}}_{nd}$  に影響を与えない関節トルク  $\mathbf{l}$  によって発生できる中間リンク加速度  $\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_j$  の出しやすさの度合いを定量化し指標とする, という考え方である.  $\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_j$  を通して  $\forall \Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_j \in \mathbb{R}^m$  を実現できるかどうかは,  ${}^1\mathbf{\Lambda}_j$  に依存しており,  ${}^1\mathbf{\Lambda}_j$  により  $\forall \Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_j$  の実現の可能性が判定できる.

式 (24) より  $\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_j$  を実現する一般解  $\mathbf{l}$  を求めると次式となる.

$$\mathbf{l} = {}^1\mathbf{\Lambda}_j^+ \Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_j + (\mathbf{I}_n - {}^1\mathbf{\Lambda}_j^+ {}^1\mathbf{\Lambda}_j) \mathbf{l} \quad (25)$$

$\mathbf{l}$  は  $\mathbf{l}$  と同様に  $\mathbf{l} \in \mathbb{R}^n$  を満たす任意ベクトルである. ここで新たなトルク入力  $\mathbf{l}$  に対する制約として  $\|\mathbf{l}\| \leq l_i^{\text{lim}}$  を考える場合, 変換行列  $\mathbf{L} = \text{diag}[l_1^{\text{lim}}, l_2^{\text{lim}}, \dots, l_n^{\text{lim}}]$  によって正規化されたトルク  ${}^1\hat{\mathbf{l}}$  と変換された行列  ${}^1\hat{\mathbf{\Lambda}}_j$  は

$${}^1\hat{\mathbf{l}} = \mathbf{L}^{-1} \mathbf{l} \quad (26)$$

$${}^1\hat{\mathbf{\Lambda}}_j = {}^1\mathbf{\Lambda}_j \mathbf{L} \quad (27)$$

のように表され,  $\|{}^1\hat{\mathbf{l}}\| \leq 1$  を満足するような関節トルク  ${}^1\hat{\mathbf{l}}$  を用いて実現し得る各リンクの先端加速度  $\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_j$  のすべてからなる集合を考えると, それは式 (28) で表され,  ${}^1\hat{\mathbf{\Lambda}}_j$  の値域空間の次元を持つユークリッド空間内のだ円体 (Fig. 1 (b)) となり, これを動的形状変更可操作性だ円体 (Dynamic Reconfiguration Manipulability Ellipsoid, 以下 DRME) と呼ぶ.

$$\begin{aligned} (\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_j)^T \left[ ({}^1\hat{\mathbf{\Lambda}}_j)^T \mathbf{L}^2 ({}^1\hat{\mathbf{\Lambda}}_j)^T \right]^+ (\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_j) &\leq 1, \\ \text{and } \Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_j &\in \mathbb{R}({}^1\hat{\mathbf{\Lambda}}_j) \end{aligned} \quad (28)$$

次に, DRM の概念に基づきマニピュレータ形状を比較するための指標について考える. 行列  ${}^1\hat{\mathbf{\Lambda}}_j$  の特異値分解により,

$${}^1\hat{\mathbf{\Lambda}}_j = {}^1\mathbf{U}_j {}^1\mathbf{\Sigma}_j {}^1\mathbf{V}_j^T \quad (29)$$

$${}^1\Sigma_j = \begin{matrix} & r & n-r \\ & & \\ r & \begin{bmatrix} {}^1\sigma_{j,1} & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & {}^1\sigma_{j,r} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \\ m-r & \begin{bmatrix} \mathbf{0} & & \mathbf{0} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (30)$$

ただし,  ${}^1\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ ,  ${}^1\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  は直交行列であり,  $\text{rank}({}^1\hat{\mathbf{A}}_j) = r$  であり, かつ  $\sigma_{j,1} \geq \dots \geq \sigma_{j,r} > 0$  である. 第  $j$  リンクの円体の体積に比例する動的形状変更能力は次の式で表される.

$${}^1w_j = {}^1\sigma_{j,1} \cdot {}^1\sigma_{j,2} \cdots {}^1\sigma_{j,r} \quad (31)$$

本論文では,  ${}^1w_j$  を正規化された関節トルクによって第  $j$  リンク先端に作業空間の任意の方向へ加速度を発生できる度合として定義し, 第一動的形状変更可操作度 (Dynamic Reconfiguration Manipulability Measure, 以下 DRMM) と呼ぶことにする. 第  $j$  リンク先端の円体の体積は以下のように求められる.

$${}^1V_j = c_r \cdot {}^1w_j \quad (32)$$

$$c_r = \begin{cases} 2(2\pi)^{(r-1)/2} / [1 \cdot 3 \cdots (r-2)r] & (r: \text{奇数}) \\ (2\pi)^{r/2} / [2 \cdot 4 \cdots (r-2)r] & (r: \text{偶数}) \end{cases} \quad (33)$$

マニピュレータ全体のリンクについて動的形状変更能力を考慮するために動的回避可操作性形状値 (Dynamic Reconfiguration Manipulability Shape Index, DRMSI) を次のように定義する.

$${}^1W_{\text{DR}} = \sum_{j=1}^{n-1} o_j {}^1V_j \quad (34)$$

ただし,  $o_j$  は次元調整係数である.

### 2.3 回避可操作性との比較

冗長性に関する指標として, 先行研究において回避可操作性 [11] が提案されたが, これは運動学的な観点のみに基づく指標であり質量特性などの動力学的な影響を考慮していない. ここでは, 動的形状変更可操作性と回避可操作性の違いについて以下考察する. DRM と同様の名称の付け方とより一般的な利用を考えて, 回避可操作性を形状変更可操作性 (Reconfiguration Manipulability, 以下 RM) と呼ぶことにする. RM は式 (3) を基に式 (16) のような手先タスクの次元選択を行い,  $\dot{\mathbf{r}}_n$  を式 (35) によって表し,  $i = n$  での  $\dot{\mathbf{q}}$  についての一般解を式 (36) によって求め, 手先指示速度  $\dot{\mathbf{r}}_{nd}$  が実現された状態での中間リンクとの速度の関係は式 (37) と求められる.

$$\dot{\mathbf{r}}_n = \mathbf{J}_n \dot{\mathbf{q}} \quad (35)$$

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_n^+ \dot{\mathbf{r}}_{nd} + (\mathbf{I}_n - \mathbf{J}_n^+ \mathbf{J}_n) {}^1\mathbf{l}_q \quad (36)$$

$${}^1\dot{\mathbf{r}}_j = \mathbf{J}_j \mathbf{J}_n^+ \dot{\mathbf{r}}_{nd} + \mathbf{J}_j (\mathbf{I}_n - \mathbf{J}_n^+ \mathbf{J}_n) {}^1\mathbf{l}_q \quad (37)$$

ただし,  ${}^1\mathbf{l}_q \in \mathbb{R}^n$  は任意ベクトルである. 式 (37) 中の変数を式 (38), (39) のように新たな変数によって定義することで, 式 (40) を得る.

$$\Delta^1 \dot{\mathbf{r}}_j \triangleq \dot{\mathbf{r}}_j - \mathbf{J}_j \mathbf{J}_n^+ \dot{\mathbf{r}}_{nd} \quad (38)$$

$${}^1\mathbf{J}_{Qj} \triangleq \mathbf{J}_j (\mathbf{I}_n - \mathbf{J}_n^+ \mathbf{J}_n) \quad (39)$$

$$\Delta^1 \dot{\mathbf{r}}_j = {}^1\mathbf{J}_{Qj} {}^1\mathbf{l}_q \quad (40)$$

RM の基本的な考え方は式 (40) を基礎式として, 手先目標速度を実現した上で, 発生できる中間リンク速度と関節角速度の関係を表し, 冗長性利用のための操作性の良し悪しを指標化するというものである. ある中間リンクの速度の出しやすさを表す指標である形状変更可操作度 (Reconfiguration Manipulability Measure, 以下 RMM) やその指向性を表す形状変更可操作性円体 (Reconfiguration Manipulability Ellipsoid, 以下 RME), そしてマニピュレータ全体を評価するための形状変更可操作性形状値 (Reconfiguration Manipulability Shape Index, 以下 RMSI) は, 式 (40) を基に前節の方法と同様にして求められる.

## 3. 冗長マニピュレータ PA10 への適用例

### 3.1 手先タスクに対する姿勢評価

代表的な作業用マニピュレータである PA10 (三菱重工業株式会社製) は冗長性を有しているため与えられた手先位置・姿勢を実現するマニピュレータ形状は多数存在し, その形状によって動的形状変更能力の優劣が生まれる. そこで, 本シミュレーションでは PA10 に対し, 与えられた手先タスクを実現する中で最も DRMSI が高い形状を作業空間内にマッピングする. そうすることで, マニピュレータが作業する前に動的形状変更能力が高い形状を取りうる作業対象物との位置関係を知ることができる. なお本報告では, 円体については作業空間内の位置に関する操作性のみを考え, 姿勢の操作性については評価しない.

使用する PA10 のモデルを Fig. 3 に表し, 各リンク質量  $m_i$  [kg], 各リンク長さ  $l_i$  [m], 各関節の粘性摩擦係数  $d_i$  [N · m / (rad/s)] を Table 1 に表す. 与える手先タスクは溶接・研磨作業などを想定し, 手先位置・姿勢に関して 5 変数  $\mathbf{r}_{\text{Ed}} = [r_{xd}, r_{yd}, r_{zd}, \phi_d, \theta_d]^T$  を指定する. Fig. 4 に示すよ

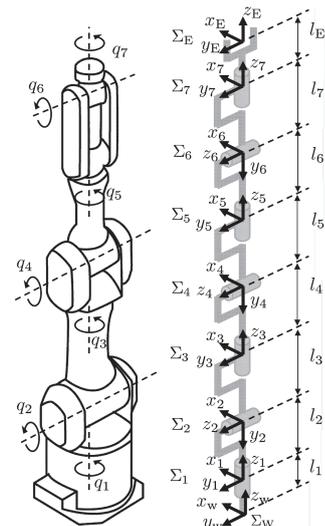


Fig. 3 Structure model of PA10

Table 1 Physical parameters

Link	$m_i$	$l_i$	$d_i$
1	3.04	0.2	2.0
2	9.78	0.115	2.0
3	8.41	0.315	2.0
4	3.51	0.135	2.0
5	4.31	0.261	2.0
6	3.45	0.239	2.0
7	1.7	0.08	2.0
End	0.1	0.1	—

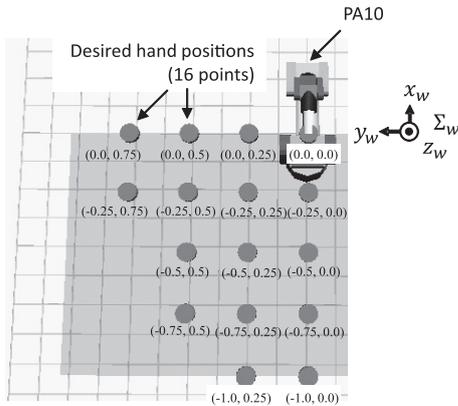


Fig. 4 Situation of desired hand position and orientation

うに与える手先タスクのうち3変数 ( $r_{zd} = 0.6$  [m],  $\phi_d = 0^\circ$ ,  $\theta_d = -90^\circ$ ) は固定し, 残り2変数 ( $r_{xd}$ ,  $r_{yd}$ ) の変化によってマッピングする. ここで, 手先姿勢表現に用いるオイラー角について,  $\Sigma_W$  の  $z_W$  軸まわりに角度  $\phi$  回転させた座標系を  $\Sigma_A$  とし, 次に  $\Sigma_A$  の  $y_A$  軸まわりに角度  $\theta$  回転させた座標系  $\Sigma_B$  とし, 最後に  $\Sigma_B$  の  $z_B$  軸まわりに角度  $\psi$  回転させた座標系を  $\Sigma_C$  と定義し, 手先座標系  $\Sigma_E$  を  $\Sigma_C$  の定義に従って表すことにする. マニピュレータ形状は Pieper の方法 [15] により決定するが, 7自由度を有する PA10 に5変数の手先タスクを与えたときの冗長自由度を第1関節と第2関節の角度  $q_1$ ,  $q_2$  に与えるものとし, 任意の  $q_1$ ,  $q_2$  を与えることでマニピュレータの形状を一意に定める. その形状に対する  ${}^1W_{DR}$  の分布 (DRMSI 分布) を Fig. 4 に示す 16 点の目標手先位置に対して計算した結果を Fig. 5 に示し, それぞれの分布における最大値をとるマニピュレータ形状と DRME を Fig. 6 に示す. 同様に,  $q_1$ ,  $q_2$  に対する RMSI の分布 (RMSI 分布) を Fig. 7 に示し, その最大値をとる形状と RME を Fig. 8 に示す. DRMSI 分布および RMSI 分布において目標手先位置を実現可能な  $q_1$ ,  $q_2$  が存在する部分を黒色以外の色で表し, 逆運動学の解が存在しない部分は値を 0 として黒色で表す. 各分布において多峰性の性質がみられ, RMSI 分布に比べ DRMSI 分布は局所的なピークが存在することが分かる. それぞれの分布の最大値をとるマニピュレータ形状にも違いがみられるが, DRMSI の最大値をとる形状の共通点は  $q_3 = 0$  [deg] (もしくは  $q_3 = 180$  [deg]) である. これは  $q_3$  が 0 [deg] のとき, 同じ目標手先位置に対して回転関節  $q_4$  が最も折れ曲がった状態となり,  $q_1$ ,  $q_2$  の運動に寄

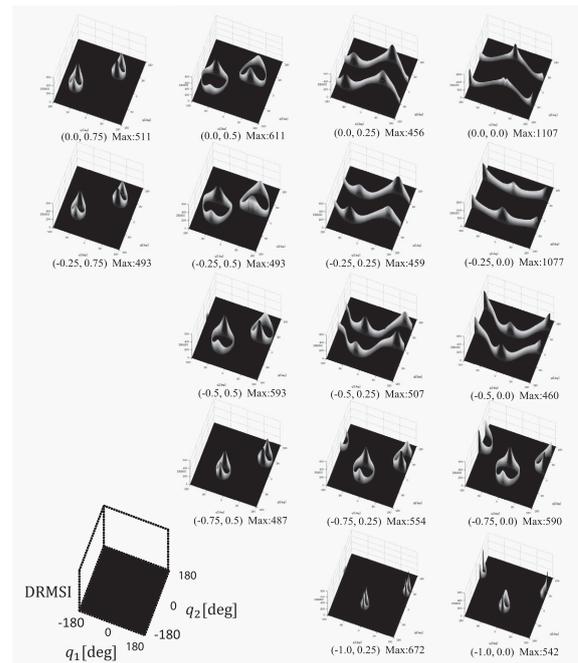


Fig. 5 DRMSI distribution for various hand positions

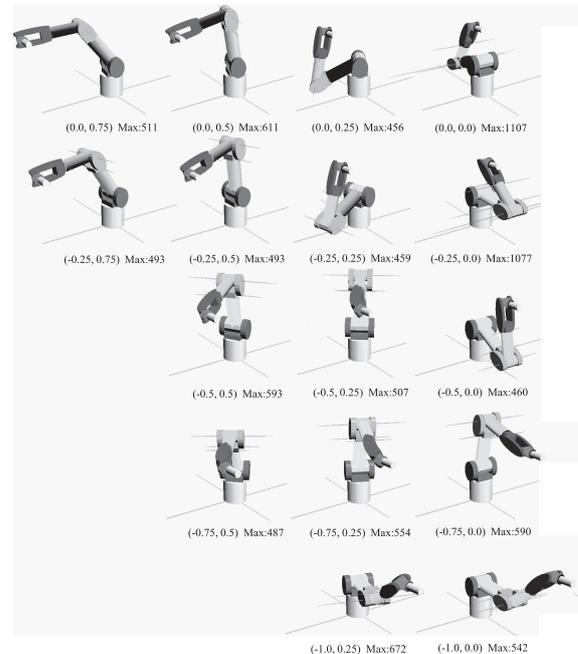


Fig. 6 Shapes of manipulator with max value of DRMSI

与する慣性モーメントが小さくなることが理由として考えられる (Fig. 3 参照). なお, RMSI の最大値をとる形状はマニピュレータの真正面 ( $r_{yd} = 0$ ) にタスクが与えられた場合複数存在し,  $x_W - z_W$  平面に対して対称の形状となっている. これはロボットが初期状態において Fig. 4 の  $x_W - z_W$  平面を基準として左右対称な形状をしており, 与えた手先の目標姿勢が手先を  $x_W$  軸に向けるような姿勢をとっているため, DRM によって導き出された最適であるとする姿勢群も  $x_W - z_W$  面に対し

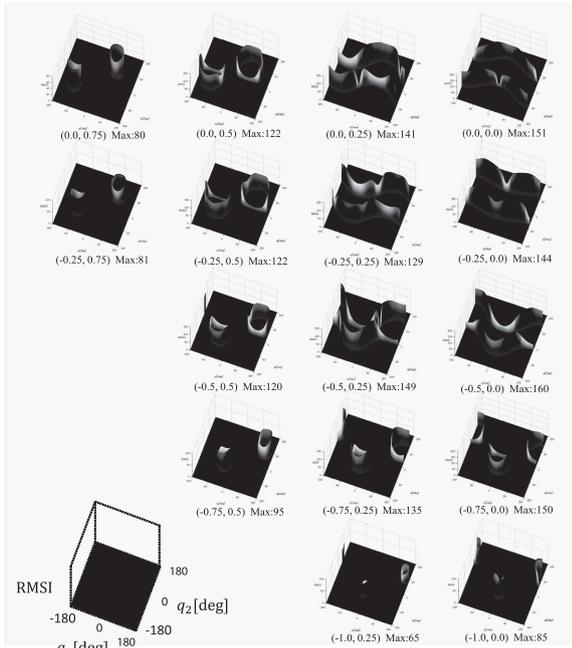


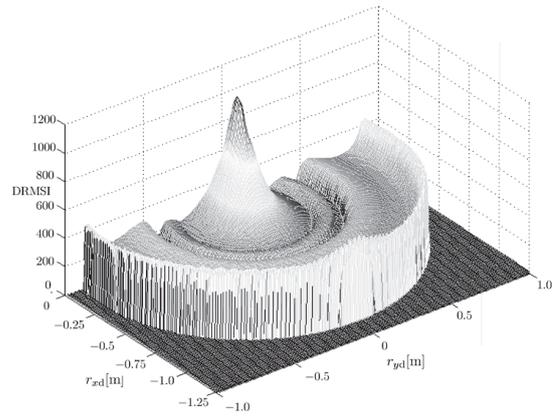
Fig. 7 RMSI distribution for various hand positions



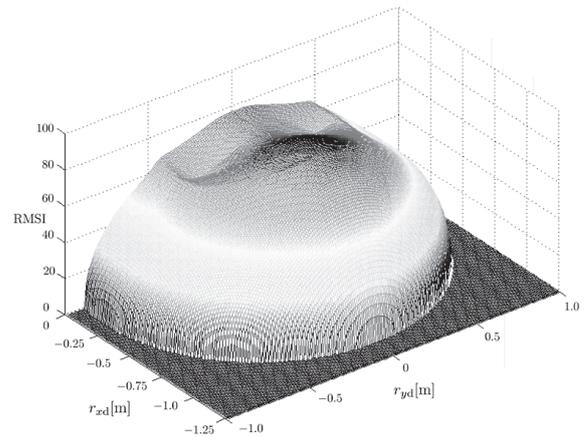
Fig. 8 Shapes of manipulator with max value of RMSI

て面対称での分布となると考える。また、だ円体は与えたタスクの次元とマニピュレータの機構や軸数によってすべて線分となり、DRMSI および RMSI は線分の長さによって計算されている。

次に、与える手先位置を 16 点のみでなく Fig. 4 に示すグレーの平面と設定し、目標タスクを実現した上で DRMSI の最大値をとる形状の作業空間上へのマッピング結果を Fig. 9 (a) に、比較のため RME の体積の総和である RMSI の最大値をとる形



(a)



(b)

Fig. 9 Distribution of max value of (a) DRMSI and (b) RMSI, which is calculated from manipulator's shape realizing desired hand position and orientation

状の作業空間上へのマッピング結果を Fig. 9 (b) に示す。

作業空間内で DRMSI の最大値をとる位置は  $(r_{xd} = -0.11, r_{yd} = 0)$  であり、RMSI では  $(r_{xd} = -0.62, r_{yd} = 0)$  であり、比較的手先が原点に近い位置で動的形状変更能力が高くなっている。どちらも  $r_{yd} = 0$  にピークがあるが、これはマニピュレータの機構が左右対称であるためと、与えた手先タスクの位置  $\Sigma_E$  と PA10 の原点  $\Sigma_W$  を結ぶ直線が、回転を許容された  $\Sigma_E$  の  $x$  軸回りの回転軸と一致したためと考えられる。また、Fig. 9 (b) ではマニピュレータが与えられたタスクを実現可能な範囲の境界に近づくにつれて緩やかに RMSI が減少しているが、Fig. 9 (a) ではその境界に近づくとも DRMSI が増加している。これは、手先特異姿勢（マニピュレータ全体が伸びきった姿勢）に近づくとも動的形状変更能力が高くなることを示している。

### 3.2 自由度に関する議論

PA10 は 7 自由度のマニピュレータであるため、手先タスクと中間リンクの自由度には制限がある。本論文で取り上げたように、手先タスクが溶接作業のような 5 自由度である場合中間

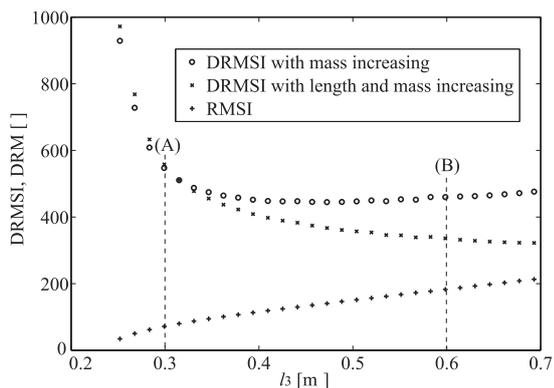


Fig. 10 DRMSI and RMSI for changing of length and mass

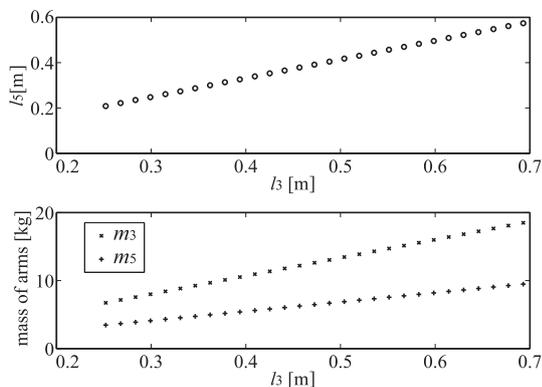


Fig. 11 Parameter relation of arm length and mass

リンクは2自由度有することとなり、ある姿勢に対して定められた面上の加速度を発生させることが可能となる。一方で、手先タスクが6自由度である場合は、中間リンクは1自由度を有しある姿勢に対して定められた線上の加速度しか発生させることができない。中間リンクを  $\Sigma_W$  座標系における  $xyz$  方向に加速させるためには手先タスクを4自由度に設定し、中間リンクを3自由度とする必要がある。いずれの場合も DRM を用いて議論することができる。

### 3.3 機構解析への応用

前述のように与えられた手先タスクに対して姿勢を評価できる一方で、DRM の応用先として機構の評価にも用いることができる。ここでは手先の姿勢を固定して、PA10 のリンク長さ  $l_3$  と  $l_5$  を変化させた場合に DRMSI と RMSI がどのように変化するかを調べた。手先座標は Fig. 5 における  $[x, y, z]^T = [0, 0.75, 0.6]^T$  を与え、Table 1 のリンク長さ  $l_3$  と  $l_5$  を増加させた場合とリンク長さに加えリンク質量  $m_3$  と  $m_5$  を増加させた場合の DRMSI と RMSI の変化を Fig. 10 に示す。また、 $l_3$  と  $l_5$ 、 $m_3$ 、 $m_5$  の関係を Fig. 11 に示す。Fig. 10 において RMSI はリンク質量の影響を受けないから、条件の差異に対して RMSI は変化しない。このため Fig. 10 では RMSI は一つの値のみを示している。また  $l_3 = 0.25$  [m] より小さいリンク長のときは手先が目標位置に届かなかったため、DRMSI と RMSI の値は存在しない。手先タスクが与えられた場合、アームの長さが長くなるほど肘をたたむような状態になるため、中間リンクの発生可能な

加速度は減少して、発生可能な速度は増加する。そのため、リンクの増加とともに DRMSI は減少し、RMSI は増加する。リンク質量が一定の場合は DRMSI は  $l_3 = 0.4$  [m] 付近で最小値になる。一方で、リンク質量も同時に増加する場合は DRMSI は  $l_3 = 0.25$  [m] 以降単調減少である。現実的にはリンク長さが増加すればリンク質量も増加すると考えられる。投てき作業のように中間リンクが加速度を要するものであれば、Fig. 10 (A) のようなリンク長さを選べばよいし、溶接作業のように中間リンクが移動速度を要するものであれば、Fig. 10 (B) のようなリンク長さを選べばよい。速度と加速度のバランスを考慮する指標として、DRM は機構設計に用いることができる。

このように、機構パラメータに対する中間リンクの DRMSI と RMSI の変化を見ることでマニピュレータの機構解析にも応用できる。Fig. 10 においてどのリンクパラメータが最適であるかは中間リンクがタスクにおいて必要とする速度、加速度によるため本論文の議論を超えるものであり、今後の課題である。

## 4. 結 言

本論文では、ロボットの末端リンク先端に与えられたタスクの実現に影響しない関節トルクによって実現しうる中間リンクの加速度の出しやすさを表した概念である「動的形状変更可操作用性 (Dynamic Reconfiguration Manipulability, DRM)」を提案した。そして、DRM に基づく指標を冗長マニピュレータ PA10 に適用することで、その物理的性質を確認し、妥当性・有効性をシミュレーションにより検証した。

## 参 考 文 献

- [1] H. Asada: "A geometrical representation of manipulator dynamics and its application to arm design," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol.105, no.3, pp.131-135, 1983.
- [2] T. Yoshikawa: "Manipulability of Robotic Mechanisms," *The International Journal of Robotics Research*, vol.4, no.2, pp.3-9, 1985.
- [3] T. Yoshikawa: "Dynamic Manipulability of Robot Manipulators," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol.2, no.1, pp.113-124, 1985.
- [4] R. Koeppe and T. Yoshikawa: "Dynamic manipulability analysis of compliant motion," *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems '97, 1997*.
- [5] P. Chinacchio: "New dynamic manipulability ellipsoid for redundant manipulators," *Robotica*, vol.18, no.4, pp.381-387, 2000.
- [6] R. Kurazume and T. Hasegawa: "Impedance Matching for a Serial Link Manipulator," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.4802-4808, 2004.
- [7] K. Yoshida, N. Hata, S. Oh and Y. Hori: "Extended Manipulability Measure and Application for Robot Arm Equipped with Bi-articular Driving Mechanism," *Proc. of the Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp.3083-3088, 2009.
- [8] N. Naksuk and C.S. George Lee: "Zero Moment Point Manipulability Ellipsoid," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1970-1975, 2006.
- [9] 吉川恒夫: *ロボット制御基礎論*, コロナ社, 1988.
- [10] 吉川恒夫: "冗長性を有するロボットの制御", *日本ロボット学会誌*, vol.2, no.6, pp.587-592, 1984.
- [11] 見浪護, 内藤康弘, 朝倉俊行: "冗長マニピュレータの回避可操作用性",

日本ロボット学会誌, vol.17, no.6, pp.887–895, 1999.

- [12] M. Minami, T. Zhang, F. Yu, Y. Nakamura, O. Yasukura, W. Song, A. Yanou and M. Deng: “Reconfiguration Manipulability Analyses for Redundant Robots in View of Structure and Shape,” Proc. of International Conference of SCIS & ISIS, pp.971–976, 2010.
- [13] Y. Kobayashi, M. Minami, A. Yanou and T. Maeda: “Dynamic Reconfiguration Manipulability Analyses of Humanoid

Bipedal Walking,” Proc. of 2013 IEEE International Conference on Robotic and Automation (ICRA2013), pp.4764–4769, 2013.

- [14] 小林洋祐, 見浪護, 矢納陽: “冗長マニピュレータの動的形状変更可操作性”, 日本機械学会論文集, vol.80, no.881, p.DR0048, 2014.
- [15] D.L. Pieper: The Kinematics of Manipulators Under Computer Control, Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, AIM 72, 1968.



見浪 護 (Mamoru Minami)

1993 年金沢大学大学院自然科学研究科博士課程修了。博士 (工学)。1994 年福井大学工学部機械工学科助教授, 2002 年同知能システム工学科教授, 2010 年岡山大学大学院自然科学研究科教授, 現在に至る。ロボットの力学, 拘束運動, 力制御, 移動マニピュレータの制御, 画像認識, ビジュアルサーボイング等の研究に従事。日本機械学会, 計測自動制御学会, IEEE などの会員。(日本ロボット学会正会員)

等の研究に従事。



松野隆幸 (Takayuki Matsuno)

2004 年名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻博士課程後期課程満期退学。博士 (工学)。2004 年より名古屋大学大学院工学研究科助手, 2006 年富山県立大学工学部助手, 2008 年富山県立大学工学部講師。2011 年岡山大学大学院自然科学研究科講師, 現在に至る。産業用マニピュレータの研究に従事。(日本ロボット学会正会員)

の研究に従事。



小林洋祐 (Yosuke Kobayashi)

2011 年岡山大学工学部システム工学科卒業, 2013 年岡山大学大学院自然科学研究科機械システム工学専攻修士課程修了。同年ナカシマプロペラ (株) 入社。



矢納 陽 (Akira Yanou)

2001 年岡山大学大学院自然科学研究科修了。工学博士。2002 年近畿大学工学部助手。2004 年近畿大学工学部講師。2009 年岡山大学大学院自然科学研究科助教。予測制御の研究に従事。2016 年 4 月より川崎医療短期大学放射線技術科准教授。