

冗長マニピュレータの動的形状変更可操作性*

小林 洋祐^{*1}, 見浪 護^{*2}, 矢納 陽^{*2}

Dynamic reconfiguration manipulability for redundant manipulators

Yosuke KOBAYASHI, Mamoru MINAMI^{*2} and Akira YANOUE^{*2} Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University
3-1-1, Tsushima-Naka, kitaku, Okayama, 700-8530, Japan

Received 27 August 2013

Abstract

In this research, a new concept named Dynamic Reconfiguration Manipulability (DRM) is proposed, which gauges dynamical shape-changeability by using a redundancy of the robot on the premise that a primary task be given at hand. The DRM represents simultaneously how much acceleration each intermediate link can be generated and what direction the acceleration be realizable by normalized torque inputs, helping optimize designing and controlling of robots. Appropriateness and usefulness of the DRM have been confirmed by applying it to redundant manipulators and by comparing the DRM with known concept of Avoidance Manipulability.

Key Words : Dynamic reconfiguration manipulability, Redundant manipulator, Shape-changeability, Humanoid robot

1. 緒 言

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れる力と加速度の関係を表した一般化慣性楕円体 (Asada, 1983) 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 (Yoshikawa, 1985a) の提案や、ヤコビ行列をロボットの機構評価に応用する研究 (内山他, 1985) も行われた。さらに静的な力と関節トルクの関係を表した操作力楕円体、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 (Yoshikawa, 1985b, Koeppe and Yoshikawa, 1997, Chinacchio, 2000) などの概念が提案された。これらの操作性の良し悪しを表す指標は、特異姿勢からの距離や作業空間のさまざまな方向に対する動きやすさを楕円体として表現したものである。楕円体以外の指標としては、可操作性楕円体がロボットが実現できる速度を過小評価する可能性があることを指摘して提案された牧田、古荘らの速度多面体表現がある (牧田、古荘, 2002)。また、手先の負荷重量を考慮することで動的可操作性楕円体と操作力楕円体を統一的に表したインピーダンスマッチング楕円体 (Kurazume and Hasagawa, 2004) や拡張した可操作性指標を二関節筋を有するロボットへ応用した研究がある (Yoshida, et al., 2009)。歩行ロボットにおいても ZMP 可操作性 (Nakasuk and Lee, 2006) 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。

* 論文 No.13-00651 [DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0048]

^{*1} 岡山大学大学院自然科学研究科機械システム工学専攻

^{*2} 正員, 岡山大学大学院自然科学研究科機械システム工学専攻 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)
E-mail: minami-m@cc.okayama-u.ac.jp

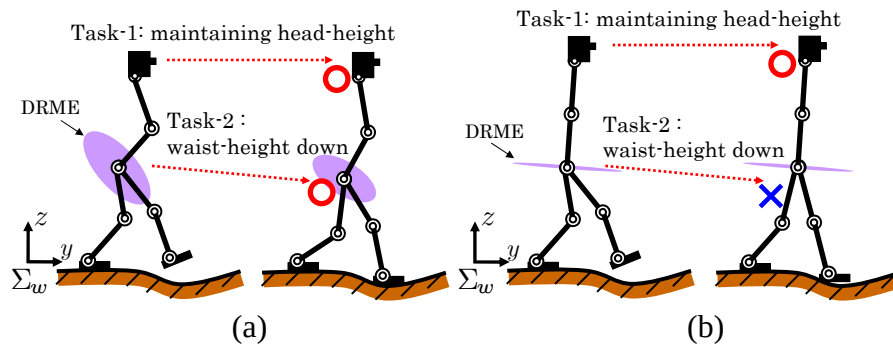


Fig. 1 Walking on uneven ground with (a) no-singular configuration has a redundant ability to accelerate the waist position during keeping head pose and reading the foot to the uneven ground (b) partially singular configuration (from waist to head) cannot afford to keep the current head pose, during reaching the foot to ground. This result can be seen by the DRME yet having the width in z-axis and the shape is flat.

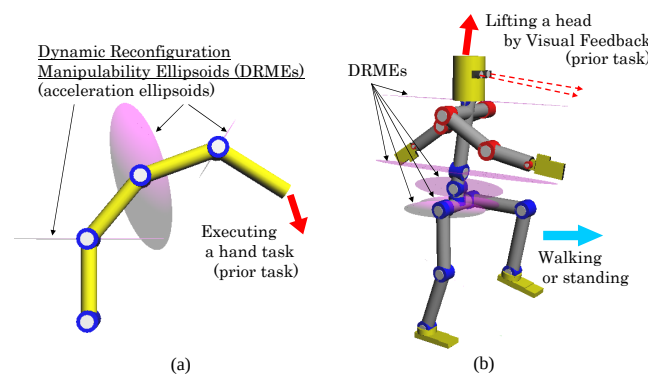


Fig. 2 Applications of dynamic reconfiguration manipulability for (a) redundant manipulator and (b) humanoid robot.

一方、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 (見浪他, 1999, Minami, et al., 2010) 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、多自由度冗長マニピュレータは自重が増加する傾向があり、機構の詳細設計や高速・高精度な運動制御を考える際には、運動学的な観点のみに基づく概念ではなく、動力学を考慮した形状変更能力を評価する指標が必要となる。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)」を提案する。この指標は、ロボットの最適設計や形状最適化のための運動性能の一つの評価指標を与えるもので、著者らはヒューマノイドロボットに適用した事例を報告した (Kobayashi, et al., 2012, Kobayashi, et al., 2013)。

文献 (Kobayashi, et al., 2012, Kobayashi, et al., 2013) では、ヒューマノイドの不整地歩行と DRM の有用性について関連付けて議論した。すなわち図 1(a) では、腰部の DRM が 2 次元垂直平面内に広がっているため、頭部の目標加速度の実現を第一タスクとして実現しつつ、不整地歩行時に接地高低差を吸収する腰部の第二サブタスクの目標加速度を同時に実現できることを示している。しかし (b) では腰から頭までの形状が部分的に特異形状になっているため、不整地歩行で接地する足を路面に沿わせようとするとき第二タスクは実現できない。このように DRM は、ピューマやチータなどの動物が頭部高さと視線方向を空間に固定しつつ走行し、かつ脚部は不整地に合わせて適応的に走行運動するという、二つの加速度運動が同時に実現可能かどうかを判定できるという特徴を持つ。図 2(b) はヒューマノイドに与えられた第一のタスクが視線方向を空間に固定する姿勢制御であり、腰付近のリンクに DRM を描いている。このようなヒューマノイドのリンク構成は、頭部を 4 リンク先端、腰部を 2 リンク先端と考えれば、(a) の 4 リンクマニピュレータで近似できる。

以上より、頭部と腰の加速度タスクを同時に実現できるかどうかを示す DRM の基本的性質をマニピュレータのリンク数を少なくした構成で考察することは、問題の本質を保ちつつできる限り単純化したモデルで考えるという意味で DRM の性質の理解の助けになると考えられる。そこで本報では、まず提案する DRM の概念とその物理的性質の確認、妥当性や有用性を 2 次元平面内を運動する 4 リンクマニピュレータを使用した数値シミュレーションによって検証する。

2. 動的形状変更可操作性

本報で提案する DRM は吉川が提案した動的可操作性 (Yoshikawa, 1985b) と形状変更可操作性 (見浪他, 1999, Minami, et al., 2010) を組み合わせた概念である。リンク動的可操作性は動的可操作性をすべてのリンクに定義した概念であり、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。

2.1 リンク動的可操作性

マニピュレータの運動方程式は一般的に

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

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

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{f}_i(\mathbf{q}) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

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

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

ここで、 $\mathbf{J}_i(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ は $\dot{\mathbf{r}}_i$ の $\mathbf{q}$ 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 $\mathbf{J}_i = [\tilde{\mathbf{J}}_i, \mathbf{0}]$, $\tilde{\mathbf{J}}_i \in \mathbb{R}^{m \times i}$ として表される。さらに式 (3) を時間 t で微分することで、

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

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

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

が得られる。さらに、

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

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

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

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

リンク動的可操作性は式 (8) を基礎式として、動力学的な制約下で関節トルク $\tilde{\boldsymbol{\tau}}$ によって各リンク先端加速度 $\ddot{\mathbf{r}}_i$ の発生しやすさを定量化し指標とする、という考え方である。ここで、 $\tilde{\boldsymbol{\tau}}$ の一般解を求めると、

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}} = (\mathbf{J}_i\mathbf{M}^{-1})^+\ddot{\mathbf{r}}_i + [\mathbf{I}_n - (\mathbf{J}_i\mathbf{M}^{-1})^+(\mathbf{J}_i\mathbf{M}^{-1})]\mathbf{k} \quad (9)$$

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

ここで、 $\|\tilde{\boldsymbol{\tau}}\|$ が $\|\tilde{\boldsymbol{\tau}}\| \leq 1$ を満足するような関節トルク $\tilde{\boldsymbol{\tau}}$ を用いて実現し得る各リンクの先端加速度 $\ddot{\mathbf{r}}_i$ の全てからなる集合を考えると、それは式 (10) で表され、 $\mathbf{J}_i\mathbf{M}^{-1}$ の値域空間の次元を持つユークリッド空間内の楕円体 (図 3(a)) となる。

$$\ddot{\mathbf{r}}_i^T \left[\mathbf{J}_i (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{J}_i^T \right]^+ \ddot{\mathbf{r}}_i \leq 1, \quad \text{and} \quad \ddot{\mathbf{r}}_i \in R(\mathbf{J}_i\mathbf{M}^{-1}) \quad (10)$$

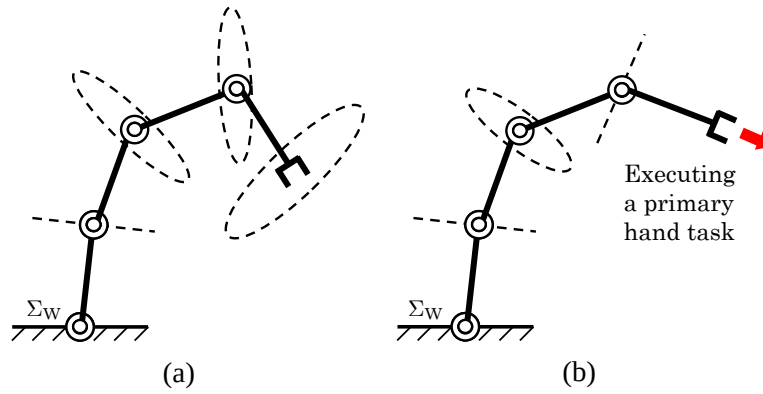


Fig. 3 (a) Dynamic manipulability ellipsoids (DMEs) represent the realizable accelerations $\ddot{\mathbf{r}}_i$ for each link without prior task at hand, and (b) dynamic reconfiguration manipulability ellipsoids (DRMEs) represent the realizable accelerations $\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_j$ for intermediate links with a hand task being executed as a primary acceleration task.

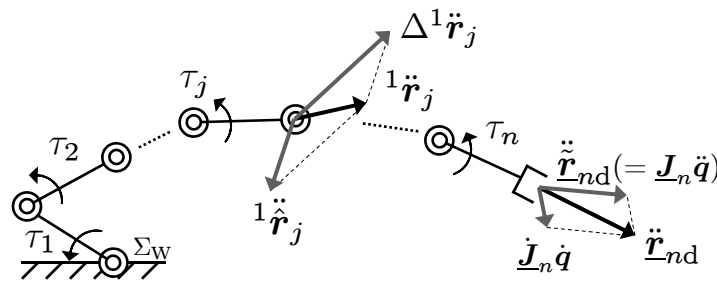


Fig. 4 Reconfiguration relation of j -th intermediate link during hand executing task $\ddot{\mathbf{r}}_{nd}$. ${}^1\ddot{\mathbf{r}}_j$ means influence of hand task to j -th link as shown in Eq.(15). $\mathbf{J}_j \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ \ddot{\mathbf{r}}_{nd}$ is a induced acceleration of j -th link by $\ddot{\mathbf{r}}_{nd}$. If ${}^1\ddot{\mathbf{r}}_j$ is required to be generated at j -th link, $\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_j$ determined by Eq.(16) have to be realized through ${}^1\mathbf{l}$ in Eq.(18).

2.2 動的形状変更可操作性 (DRM)

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. $\ddot{\mathbf{r}}_n$ と $\ddot{\boldsymbol{\tau}}$ の関係は式 (8) より次式の様に表される.

$$\ddot{\mathbf{r}}_n = \mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1} \ddot{\boldsymbol{\tau}} \quad (11)$$

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, $\ddot{\mathbf{r}}_{nd}$ を実現するための $\ddot{\boldsymbol{\tau}}$ は, 上式の一般解を求めることによって得られる.

$$\ddot{\boldsymbol{\tau}} = (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ \ddot{\mathbf{r}}_{nd} + [\mathbf{I}_n - (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})] {}^1\mathbf{l} \quad (12)$$

${}^1\mathbf{l} \in \mathbb{R}^n$ 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 ${}^1\mathbf{l}$ の単位は関節トルクと一致する. 式 (12) の右辺第一項は $\ddot{\mathbf{r}}_{nd}$ 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. また第二項は, 第一項による $\ddot{\mathbf{r}}_{nd}$ 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 ${}^1\mathbf{l}$ 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, 第二, 第三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 $\ddot{\mathbf{r}}_{nd}$ を実現している際の第 j リンク加速度 ${}^1\ddot{\mathbf{r}}_j$ との関係は, 式 (8) と式 (12) より $\ddot{\boldsymbol{\tau}}$ を消去することによって次式のように表される.

$${}^1\ddot{\mathbf{r}}_j = \mathbf{J}_j \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ \ddot{\mathbf{r}}_{nd} + \mathbf{J}_j \mathbf{M}^{-1} [\mathbf{I}_n - (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})] {}^1\mathbf{l} \quad (13)$$

さらに式 (7) の関係により式 (13) は次式のように書き直すことができる.

$${}^1\ddot{\mathbf{r}}_j - \dot{\mathbf{J}}_j \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{J}_j \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ (\ddot{\mathbf{r}}_{nd} - \dot{\mathbf{J}}_n \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{J}_j \mathbf{M}^{-1} [\mathbf{I}_n - (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})] {}^1\mathbf{l} \quad (14)$$

ここで,

$${}^1\ddot{\mathbf{r}}_j \triangleq \dot{\mathbf{J}}_j \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}_j \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ (\ddot{\mathbf{r}}_{nd} - \dot{\mathbf{J}}_n \dot{\mathbf{q}}) \quad (15)$$

$$\Delta {}^1\ddot{\mathbf{r}}_j \triangleq {}^1\ddot{\mathbf{r}}_j - {}^1\ddot{\mathbf{r}}_j^* \quad (16)$$

$${}^1\mathbf{A}_j \triangleq \mathbf{J}_j \mathbf{M}^{-1} [\mathbf{I}_n - (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})] \quad (17)$$

によって新たな変数を定義することで、式 (14) は次式のように表せる。

$$\Delta {}^1\ddot{\mathbf{r}}_j = {}^1\mathbf{A}_j {}^1\mathbf{l} \quad (18)$$

式 (4), (7), (15) および (16) の関係を図 4 に示す。式 (15) 中の ${}^1\ddot{\mathbf{r}}_j$ はマニピュレータのハンドの加速度タスクが原因となり発生する j リンクの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。式 (16) より ${}^1\ddot{\mathbf{r}}_j$ 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 ${}^1\mathbf{l}$ によって発生させる必要があることがわかる。ここで、動的形状変更可操作性 (Dynamic Reconfiguration Manipulability, DRM) は、式 (18) 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 ${}^1\mathbf{l}$ 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た指標である。 $\Delta {}^1\ddot{\mathbf{r}}_j$ を通して $\forall {}^1\ddot{\mathbf{r}}_j \in \mathbb{R}^m$ を実現できるかどうかは、 ${}^1\mathbf{A}_j$ に依存しており、 ${}^1\mathbf{A}_j$ により $\forall \Delta {}^1\ddot{\mathbf{r}}_j$ の実現の可能性を判定できる。

式 (18) より $\Delta {}^1\ddot{\mathbf{r}}_j$ を実現する一般解 ${}^1\mathbf{l}$ を求めると次式となる。

$${}^1\mathbf{l} = {}^1\mathbf{A}_j^+ \Delta {}^1\ddot{\mathbf{r}}_j + (\mathbf{I}_n - {}^1\mathbf{A}_j^+ {}^1\mathbf{A}_j) {}^2\mathbf{l} \quad (19)$$

式 (19) で、 ${}^2\mathbf{l} \in \mathbb{R}^n$ はトルクの次元を持つ新たな任意ベクトルである。 $\mathbf{I}_n - {}^1\mathbf{A}_j^+ {}^1\mathbf{A}_j$ にランクが残っている場合には第 j リンク以外の中間リンクの加速度を指定できる余裕がある。 ${}^1\mathbf{l}$ が、 $\|{}^1\mathbf{l}\| \leq 1$ を満たすように制約を受ける場合には、式 (19) より次式が得られる。

$$(\Delta {}^1\ddot{\mathbf{r}}_j)^T ({}^1\mathbf{A}_j^+ {}^1\mathbf{A}_j)^+ \Delta {}^1\ddot{\mathbf{r}}_j \leq 1 \quad (20)$$

$\mathbf{A}_j$ が行フルランクの場合、つまり $\text{rank}({}^1\mathbf{A}_j) = m$ が成立する場合には、Eq. (20) は m 次元空間に広がる楕円体となる。 $\text{rank}({}^1\mathbf{A}_j) < m$ の場合には式 (20) が縮退した楕円体となることは明らかであり、これらの楕円体は、図 3(b) に示されている。

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 ${}^1\mathbf{A}_j$ は特異値分解により、

$${}^1\mathbf{A}_j = {}^1\mathbf{U}_j {}^1\mathbf{\Sigma}_j {}^1\mathbf{V}_j^T \quad (21)$$

$${}^1\mathbf{\Sigma}_j = \begin{matrix} & \begin{matrix} r & n-r \end{matrix} \\ \begin{matrix} r \\ m-r \end{matrix} & \begin{bmatrix} {}^1\sigma_{j,1} & \mathbf{0} \\ & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & {}^1\sigma_{j,r} \\ & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (22)$$

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、 $\text{rank}({}^1\mathbf{A}_j) = r \leq m$ であり、かつ ${}^1\sigma_{j,1} \geq \dots \geq {}^1\sigma_{j,r} > 0$ である。第 j リンクの楕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。

$${}^1w_j = {}^1\sigma_{j,1} \cdot {}^1\sigma_{j,2} \cdots {}^1\sigma_{j,r} \quad (23)$$

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な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。

ここで注意しておきたい点は、DRME, DRMM とも ${}^1\mathbf{A}_j$ のみに依存して定まり、 ${}^1\mathbf{A}_j$ は式 (17) に示すように $\mathbf{J}_i(\mathbf{q})$, $\mathbf{J}_n(\mathbf{q})$ と $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ の関数であり、結局 $\mathbf{q}$ の関数である。したがって DRME, DRMM ともロボットの形状に直接依存して定まることがわかる。

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 (見浪他, 1999) 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

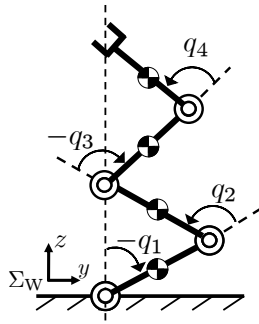


Fig. 5 4-link manipulator

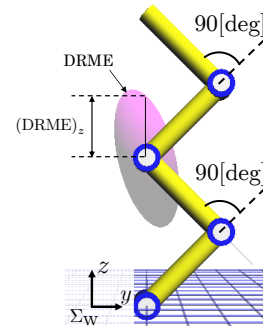


Fig. 6 Shape of manipulator

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より，回避可操作性を形状変更可操作 (Reconfiguration Manipulability, 以下 RM) と呼ぶことにする．RM は式 (3) で $i = n$ として $\dot{\mathbf{r}}_n$ を式 (24) によって表し， $\dot{\mathbf{q}}$ について的一般解を式 (25) 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 (26) と求められる．

$$\dot{\mathbf{r}}_n = \mathbf{J}_n \dot{\mathbf{q}} \quad (24)$$

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_n^+ \dot{\mathbf{r}}_{nd} + (\mathbf{I}_n - \mathbf{J}_n^+ \mathbf{J}_n)^{-1} \mathbf{l}_q \quad (25)$$

$${}^1\dot{\mathbf{r}}_j = \mathbf{J}_j \mathbf{J}_n^+ \dot{\mathbf{r}}_{nd} + \mathbf{J}_j (\mathbf{I}_n - \mathbf{J}_n^+ \mathbf{J}_n)^{-1} \mathbf{l}_q \quad (26)$$

ただし， ${}^1\mathbf{l}_q \in \mathbb{R}^n$ は任意ベクトルである．式 (26) 中の変数を式 (27),(28) のように新たな変数によって定義することで，式 (29) を得る．さらに式 (29) で $\|{}^1\mathbf{l}_q\| \leq 1$ の制約のもとで第 j リンクが発生することができる速度の形状変更可操作性楕円体 (Reconfiguration Manipulability Ellipsoid, 以下 RME) は，式 (30) で与えられる．

$$\Delta^1 \dot{\mathbf{r}}_j \triangleq \dot{\mathbf{r}}_j - \mathbf{J}_j \mathbf{J}_n^+ \dot{\mathbf{r}}_{nd} \quad (27)$$

$${}^1\mathbf{J}_{Qj} \triangleq \mathbf{J}_j (\mathbf{I}_n - \mathbf{J}_n^+ \mathbf{J}_n) \quad (28)$$

$$\Delta^1 \dot{\mathbf{r}}_j = {}^1\mathbf{J}_{Qj} {}^1\mathbf{l}_q \quad (29)$$

$$(\Delta^1 \dot{\mathbf{r}}_j)^T ({}^1\mathbf{J}_{Qj} {}^1\mathbf{J}_{Qj}^T)^{-1} \Delta^1 \dot{\mathbf{r}}_j \leq 1 \quad (30)$$

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) や形状変更可操作性楕円体 (Reconfiguration Manipulability Ellipsoid, 以下 RME) も，式 (29) をもとに同様にして求められる．

3. 4 リンクマニピュレータへの適用例

本章では，図 5 に示す 2 次元 (y-z) 平面を動く 4 リンク冗長マニピュレータ ($m = 2, n = 4$) に適用し，DRM の物理的性質を確認し，DRM に基づく指標の妥当性・有用性をシミュレーションにより検証する．4 リンクマニピュレータの物理パラメータについて，各リンクの質量，長さは $1.0[\text{kg}]$, $0.3[\text{m}]$ ，各関節の粘性摩擦係数は $1.0[\text{N} \cdot \text{m}/(\text{rad}/\text{s})]$ とし，重心位置はリンク中心にあるものとする．

3.1 DRM の性質

図 5 のように直列 4 リンクマニピュレータの第 2 関節先端と手先が第 1 関節直上にある形状において手先加速度タスクが与えられたときの第 2 リンク先端の動かしやすさを調べる．DRM はマニピュレータの形状に依存して定まり，4 リンクマニピュレータの形状は 4 変数の関節角で決定されるが，ここでは関節角に二つの拘束条件を付けて独立変数の数を二つに減らして考えることにする．すなわち， q_2 と q_4 を独立変数とし， q_1, q_3 を従属的に $q_1 = -q_2/2$, $q_3 = -(q_2 + q_4)/2$ と定める．

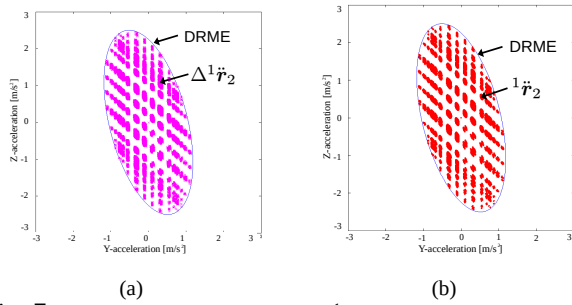


Fig. 7 Result of simulation when $\|{}^1\mathbf{l}\| \leq 1$ is input randomly with prior task $\mathbf{r}_{4d} = [0, 0]^T$, (a) represents $\Delta^1 \mathbf{r}_2$ as marked dot “x” and (b) represents ${}^1 \mathbf{r}_2$ as marked dot “o”.

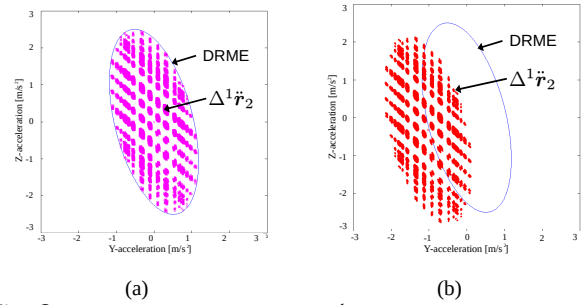


Fig. 8 Result of simulation when $\|{}^1\mathbf{l}\| \leq 1$ is input randomly with prior task $\mathbf{r}_{4d} = [1, 0]^T$, (a) represents $\Delta^1 \mathbf{r}_2$ as marked dot “x” and (b) represents ${}^1 \mathbf{r}_2$ as marked dot “o”.

3.1.1 DRME の計算例

本節で確認することは、 $\mathbf{r}_{nd} = \mathbf{0}$, $\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}$ の条件を与えた場合、式 (15) より ${}^1 \ddot{\mathbf{r}}_j = \mathbf{0}$ となるため式 (16) より $\Delta^1 \mathbf{r}_j = {}^1 \ddot{\mathbf{r}}_j$ が成立しなければならない点である。 ${}^1 \ddot{\mathbf{r}}_j$ は式 (1) によって定まる。式 (1) の入力トルク $\boldsymbol{\tau}$ を式 (12) をもとにして得られる $\hat{\boldsymbol{\tau}}$ と式 (6) を用いて定めて式 (31) のように与え、さらに $\|{}^1\mathbf{l}\| \leq 1$ の制約を課した場合には ${}^1 \ddot{\mathbf{r}}_j$ の分布は DRM に包含されるはずである。さらに $\mathbf{r}_{nd} \neq \mathbf{0}$ の場合には、 $\mathbf{r}_{nd}$ に起因する差を生じるはずである。以上の点を以下に確認する。

関節角度 $q_1 = -45^\circ, q_2 = 90^\circ, q_3 = -90^\circ, q_4 = 90^\circ$ を与えたときのマニピュレータ形状と第 2 リンク先端の DRME は図 6 のように表される。DRME は ${}^1 \mathbf{A}_j(\mathbf{q})$ を決定する手先目標加速度の次元の選択とマニピュレータの機構や形状に依存する。

ここで、入力トルクを式 (12) をもとにして得られる $\hat{\boldsymbol{\tau}}$ と式 (6) を用いて、次式によって決定する。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{u} + (\mathbf{J}_4 \mathbf{M}^{-1})^+ \ddot{\mathbf{r}}_{4d} + [\mathbf{I}_4 - (\mathbf{J}_4 \mathbf{M}^{-1})^+ (\mathbf{J}_4 \mathbf{M}^{-1})] {}^1 \mathbf{l} \quad (31)$$

ただし、 $\mathbf{u} = \mathbf{h} + \mathbf{g} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}}$ である。

まず目標手先加速度として $\ddot{\mathbf{r}}_{4d} = [a_{4y}, a_{4z}]^T = [0, 0]^T$ を与え、 $\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}$ とする。このとき式 (7) より $\ddot{\mathbf{r}}_i = \ddot{\mathbf{r}}_i$ である。図 7(a) の実線で描かれた楕円は式 (20) によって計算された DRME を表し、楕円中のドットは、式 (18) において ${}^1 \mathbf{l}$ に $\|{}^1\mathbf{l}\| \leq 1$ の制約を与えた乱数を発生させて計算した第 2 リンク先端に発生した加速度成分 $\Delta^1 \mathbf{r}_2$ の座標に「x」印を小さく描いたものである。ハンドの目標加速後の条件が $\ddot{\mathbf{r}}_{4d} = \mathbf{0}$ であるため、DRME をもとに零であるハンド発生加速度に影響を与えない第 2 リンク先端の形状変更のための発生可能な加速度の範囲を調べたものである。 $\|{}^1\mathbf{l}\| \leq 1$ の制約をもとに発生する $\Delta^1 \mathbf{r}_2$ は DRME の中に納まっていることがわかる。図 7(a) および (b) の座標系の原点は、図 6 に示すリンク 2 の先端の位置を意味し、その y, z 軸は図 6 に示す Σ_W の y, z 軸と一致している。なおこの定義は図 8(a), (b) も同様である。また条件が ${}^1 \ddot{\mathbf{r}}_{4d} = \mathbf{0}, \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}$ であるため式 (15) より ${}^1 \ddot{\mathbf{r}}_j = \mathbf{0}$ 、さらに式 (16) より $\Delta^1 \mathbf{r}_2 = {}^1 \ddot{\mathbf{r}}_2$ とならなければならない。このことを確認するため、式 (31) で定まる $\boldsymbol{\tau}$ を、式 (1) に入力し $\dot{\mathbf{q}}$ を求め、式 (4) より $\ddot{\mathbf{r}}_2$ を求めたときの $\ddot{\mathbf{r}}_2$ の分布を図 7(b) に示す。図 7(a) に示した $\Delta^1 \mathbf{r}_2$ と (b) に示した $\ddot{\mathbf{r}}_2$ は一致していることが確認された。

次に ${}^1 \ddot{\mathbf{r}}_{4d} = [1, 0]^T$ と与え、式 (15) の ${}^1 \ddot{\mathbf{r}}_j \neq \mathbf{0}$ の条件を与えたときの $\Delta^1 \mathbf{r}_2$ と ${}^1 \ddot{\mathbf{r}}_2$ を調べ、図 8 に示す。図 8(a) は DRME と $\Delta^1 \mathbf{r}_2$ の分布を、図 8(b) は DRME と $\ddot{\mathbf{r}}_2$ の分布を示す。図 8(a), (b) では $\Delta^1 \mathbf{r}_2$ と $\ddot{\mathbf{r}}_2$ は一致していない。これは ${}^1 \ddot{\mathbf{r}}_{4d} = [1, 0]^T$ と与えたため ${}^1 \ddot{\mathbf{r}}_2 = [-1.02, -0.33]^T$ が発生し、その影響によって $\ddot{\mathbf{r}}_2$ が DRME 内に収まらないのである。これは手先目標加速度の影響によるものであり、 ${}^1 \ddot{\mathbf{r}}_j$ が DRME を平行移動させる加速度成分であることは、式 (16) より明らかである。なお、図 7(a) と図 8(a) を比較し両者が一致していることで DRME がハンド目標加速度 ${}^1 \ddot{\mathbf{r}}_{4d}$ に関係であることも確認できる。ここで、図 7 と図 8 の加速度の分布には楕模様によって示される分布の偏りがあることがわかる。この原因として加えた入力 ${}^1 \mathbf{l}$ はシミュレーションに使用した C-Builder の rand 関数を用いて決定した擬似乱数であり完全な乱数でないこと、また乱数を与えた ${}^1 \mathbf{l}$ は作業座標に関連した変数ではなく関節空間に関連した変数であることから式 (15), (16), (17) の関係が Σ_W 加速度の分布に影響を与えたことが影響していると考えられる。

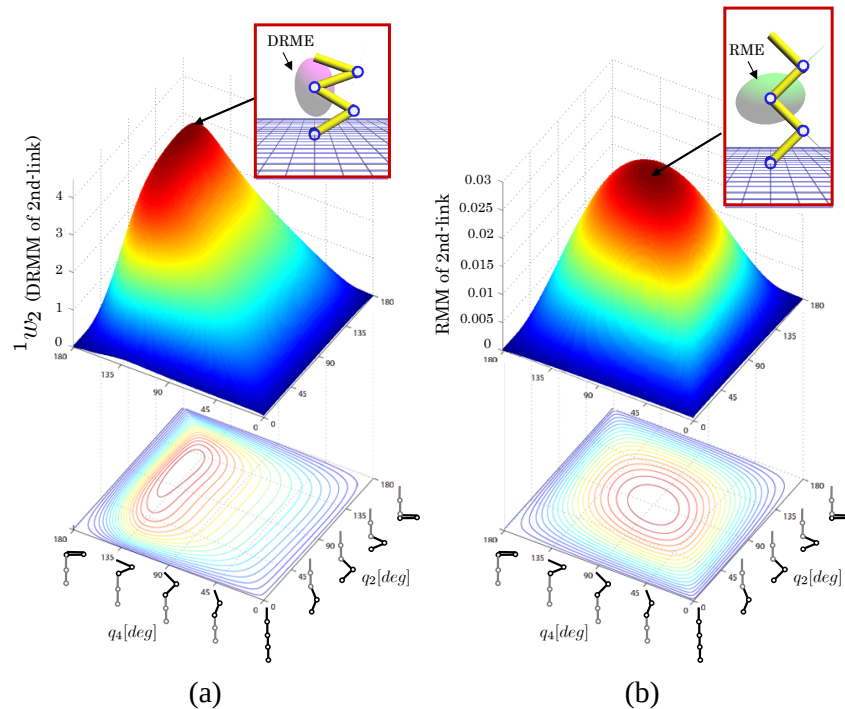


Fig. 9 1w_2 (DRMM of 2nd-link) and reconfiguration manipulability measure (RMM) (Minami, et al., 2010) of 2nd-link.

3.1.2 DRMM の計算例

任意の手先目標加速度 $\ddot{\mathbf{r}}_{4d} = [a_{4y}, a_{4z}]^T$ が与えられたときのマニピュレータの各形状に対する動的形状変更可操作度 (DRMM) を調べるとともに、形状変更可操作度 (RMM) と比較し、二つの指標の違いについて考察する。ここでは DRM が式 (28) のヤコビ行列 ${}^1\mathbf{J}_{Qj}$ に依存して定まることにに対し、DRMM が式 (17) で与えられるヤコビ行列と慣性行列によって定まる ${}^1\mathbf{A}_j$ に支配されているという違いがもたらす影響について考察する。図 9 は q_1, q_2 に対する第 2 リンクの (a)DRMM, (b)RMM を示した分布である。第 2 リンクの RMM は $q_2 = 90^\circ$, $q_4 = 90^\circ$ のとき最大となり、DRMM は $q_2 = 118^\circ$, $q_4 = 141^\circ$ のとき最大となっている。また、RMM のピークでのマニピュレータ形状に比べて、DRMM のピークでは折りたたまれたような形状である。この結果の違いは、RMM は式 (27)～式 (30) より $\mathbf{J}_j(\mathbf{q}), \mathbf{J}_n(\mathbf{q})$ に依存して定まることがわかるが、DRMM は $\mathbf{J}_j(\mathbf{q}), \mathbf{J}_n(\mathbf{q})$ とさらに $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ が影響を与えるためである。

3.2 DRM の解析

マニピュレータの操作性の良し悪しの判定方法の一つとして可操作性指標によって描かれる楕円体の体積やそれに比例する指標がある。しかし、実際に使用される場面によっては特定方向の動かしやすさが重要となることがある。例えば、マニピュレータ手先リンクの進行方向や二足歩行ロボット腰関節の重力方向などが挙げられる。そこで、図 6 に示すように第 2 リンクの DRME の z 方向への長さを $(\text{DRME})_z$ とし、4 リンクマニピュレータの第 2 リンク先端の z 方向への加速度の出しやすさを調べる。これは 4 リンクマニピュレータをヒューマノイドとみなした場合、腰の z 方向への加速度であり、ジャンプに適した形状を調べるという意味を含んでいる。

各形状に対する $(\text{DRME})_z$ を図 10(a) に示し、 $(\text{RME})_z$ を図 10(b) に示す。図 10(a), (b) とも図 9(a), (b) で用いた変数 q_2, q_4 を同様に独立変数として用いている。速度の分布図 10(b) において関節角度が増加すると $(\text{RME})_z$ は単調増加していることが分かるが、加速度の分布図 10(a) では多峰性となっている。そこで $q_4 = 130[\text{deg}]$ と固定し、図 10 から断面を取り出したものをそれぞれ図 11(a),(b) に示し、そのマニピュレータ形状と DRME, RME を表示したものをそれぞれ図 12(a), (b) に示す。

図 11 より DRME, RME とともに、第 2 関節の角度が増加するにつれ、 $(\text{RME})_z$ は単調増加しているが、 $(\text{DRME})_z$ は $q_2 = 80[\text{deg}]$ 付近をピークにその後減少し、また増加している。図 11(a) と図 12(a) を比較し、図 11(a) のピークを与えるマニピュレータの形状は $q_2 = 80, 170[\text{deg}]$ 付近であり、それらの形状は図 12(a) に示されている。DRME は式 (17),

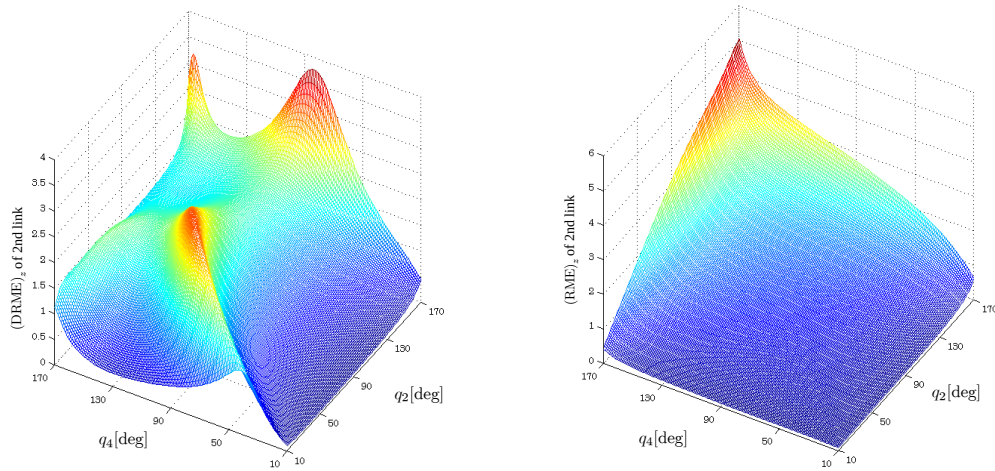


Fig. 10 (a)Vertical acceleration derived from DRME and (b)vertical velocity driven from RME.

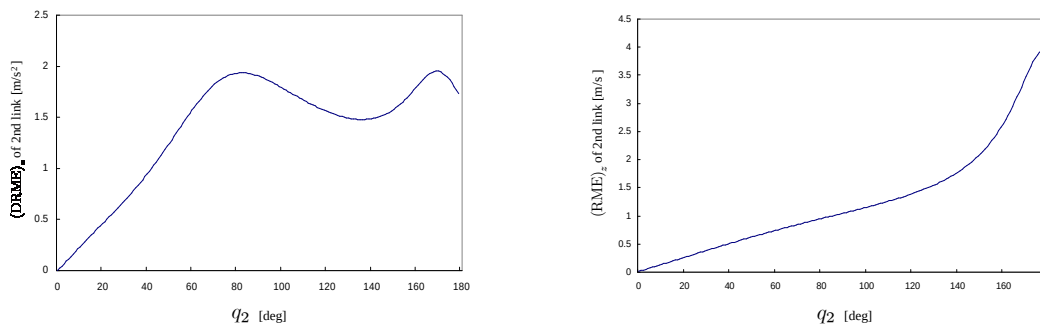
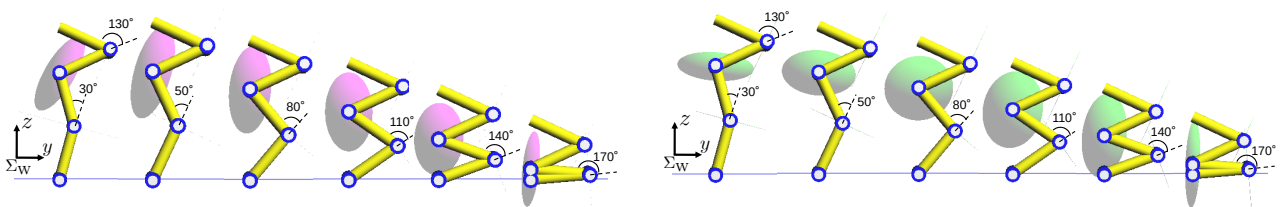
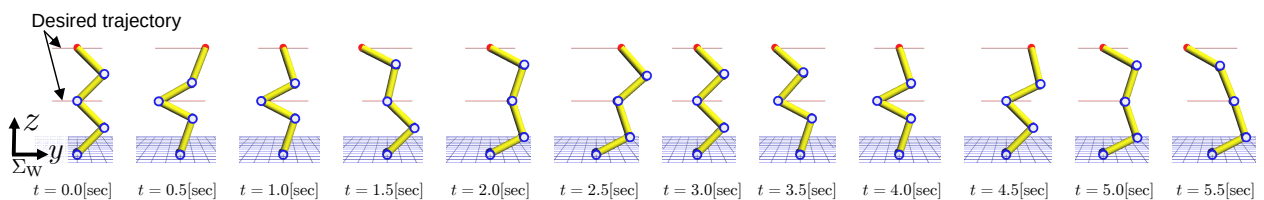

 Fig. 11 (a)Vertical acceleration derived from DRME and (b)vertical velocity driven from RME against q_2 with q_4 being fixed at $q_4 = 130[\text{deg}]$.

 Fig. 12 (a)DRME and (b)RME for various configuration got by changing q_2 from 30 to 170[deg].


Fig. 13 Manipulator's hand and tip of 2nd link tracking trajectory.

${}^1\mathbf{A}_j = \mathbf{J}_j \mathbf{M}^{-1} [\mathbf{I}_n - (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})]$ で定義される行列 ${}^1\mathbf{A}_j$ に支配され, RME は式 (28), ${}^1\mathbf{J}_{Qj} = \mathbf{J}_j (\mathbf{I}_n - \mathbf{J}_n^+ \mathbf{J}_n)$ で定義される行列 ${}^1\mathbf{J}_{Qj}$ に支配されている. 図 11(a), (b) に共通して $q_2 = 170[\text{deg}]$ 付近にピークが見られる原因は, DRME, RME とも $\mathbf{J}_j$, $\mathbf{J}_n$ が関係していることから, $\mathbf{J}_j$, $\mathbf{J}_n$ が一つの原因と推定される. したがって $q_2 = 80[\text{deg}]$ 付近の DRME のピークは DRME のみに含まれている慣性行列 $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ の影響であると考えられる.

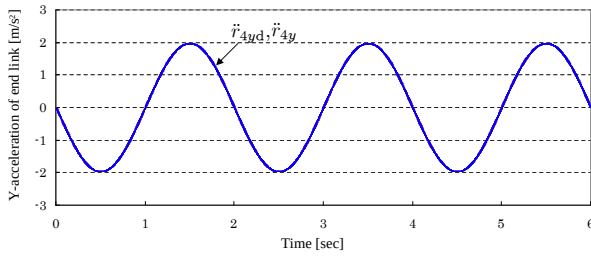


Fig. 14 Tracking performance of hand acceleration.

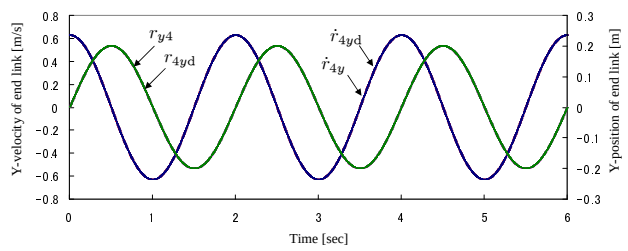


Fig. 15 Tracking performance of hand velocity and position.

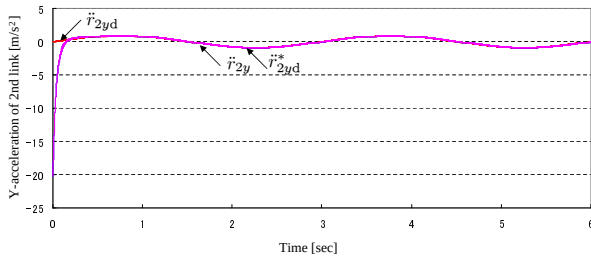


Fig. 16 Tracking performance of 2nd-link acceleration.

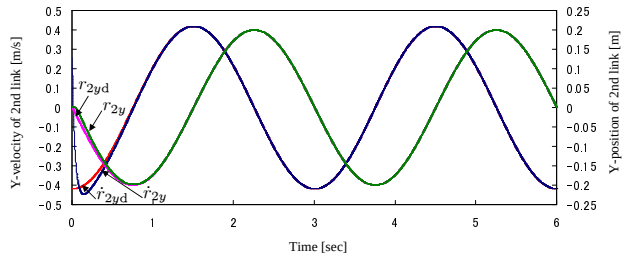


Fig. 17 Tracking performance of 2nd-link velocity and position.

3.3 手先目標加速度の実現と任意の形状変更

図6より第2リンクのDRMEはy-z平面に広がっているためこの形状では $\text{rank}({}^1\mathbf{\Lambda}_2) = 2$ であることは明らかである。つまりハンドの目標加速度と第2リンクの形状変更のためのy-z方向の任意の目標加速度は、独立して発生させることができる。このことを確認するため初期形状を図6の形状とし、手先と第2リンク先端に下記の周期目標加速度を与えた場合について調べる。

$$\ddot{\mathbf{r}}_{4d} = \begin{bmatrix} \ddot{r}_{4yd} \\ \ddot{r}_{4zd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.2(2\pi/T_1)^2 \sin(2\pi/T_1)t \\ 0 \end{bmatrix}, \quad {}^1\ddot{\mathbf{r}}_{2d} = \begin{bmatrix} \ddot{r}_{2yd} \\ \ddot{r}_{2zd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2(2\pi/T_2)^2 \sin(2\pi/T_2)t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

ただし、周期 $T_1 = 2.0[\text{sec}]$, $T_2 = 3.0[\text{sec}]$ と設定し、 $t = 0$ での状態を満たすように手先に初速を与える。第2リンクの形状変更用のトルクを ${}^1\mathbf{l} = {}^1\mathbf{\Lambda}_2^+ \Delta^1\ddot{\mathbf{r}}_{2d}$ と与える。 $\Delta^1\ddot{\mathbf{r}}_{2d}$ は式(15)と式(16)より算出される。以上をもとに式(7)より $\ddot{\mathbf{r}}_{4d}$ を算出し、さらに式(31)より入力トルク $\boldsymbol{\tau}$ を計算し、式(1)に入力することで運動を発生させる。中間リンクについては目標加速度が実現されても、初期速度・初期位置と目標との間に偏差がある場合には、位置・速度の運動に偏差が生じるため、以下では偏差を考慮した加速度コントローラとして以下のフィードバックを与えた。

$${}^1\ddot{\mathbf{r}}_{2d}^* = {}^1\ddot{\mathbf{r}}_{2d} + \mathbf{H}_v(\dot{\mathbf{r}}_{2d} - \dot{\mathbf{r}}_2) + \mathbf{H}_p(\mathbf{r}_{2d} - \mathbf{r}_2) \quad (33)$$

ただし、 $\mathbf{H}_v$, $\mathbf{H}_p$ はそれぞれ適当な対角ゲイン行列であり、 $\mathbf{H}_v = \text{diag}[30, 30]$, $\mathbf{H}_p = \text{diag}[100, 100]$ として設定する。式(16)より $\Delta^1\ddot{\mathbf{r}}_{2d} = {}^1\ddot{\mathbf{r}}_{2d} - \ddot{\mathbf{r}}_{2d}$ が成り立つため、 ${}^1\ddot{\mathbf{r}}_{2d}^*$ を、式中の ${}^1\ddot{\mathbf{r}}_{2d}$ に置き換えて $\Delta^1\ddot{\mathbf{r}}_{2d}$ を計算し、式(19)よりトルク ${}^1\mathbf{l}$ によって形状変更を行う。本シミュレーションでは $\dot{\mathbf{r}}_{2d}$, $\mathbf{r}_{2d}$ は目標加速度入力 $\ddot{\mathbf{r}}_{2d}$ を積分した値である。その結果としてy方向の運動結果をマニピュレータ形状を図13に、手先について図14, 15に、第2リンク先端について図16, 17に示す。手先目標加速度と実際の加速度は完全に一致しており、手先目標加速度の積分値によって得られる目標速度・目標位置も実現されている。また、第2リンク目標加速度が偏差を考慮した入力 $\ddot{\mathbf{r}}_{2d}^*$ へと変更され、実際の加速度 $\ddot{\mathbf{r}}_2$ は手先タスク実現に伴う影響を受けながらも $\ddot{\mathbf{r}}_{2d}^*$ に追従しており、位置・速度の偏差についても補償されていることが確認できる。

4. 結 言

本論文では、冗長マニピュレータの手先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性 (Dynamic Reconfiguration Manipulability, DRM)」を提案した。そして、DRMに基づく指標を4リンクマニピュレータに適用することで、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。

文 献

- Asada, H., A geometrical representation of manipulator dynamics and its application to arm design, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 105, No. 3 (1983), pp. 131–135.
- Chinacchio, P., A new dynamic manipulability ellipsoid for redundant manipulators, *Robotica*, Vol. 18, No. 4 (2000), pp. 381–387.
- Kobayashi, Y., Minami, M., Yanou, A. and Maeba, T., Dynamic reconfiguration manipulability analyses of redundant robot and humanoid walking, *Proceedings of the 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)* (2012), pp. 16–18.
- Kobayashi, Y., Minami, M., Yanou, A. and Maeba, T., Dynamic reconfiguration manipulability analyses of humanoid bipedal walking, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2013), pp. 4764–4769.
- Koepe, R. and Yoshikawa, T., Dynamic manipulability analysis of compliant motion, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (1997), pp. 1472–1478.
- Kurazume, R. and Hasagawa, T., Impedance matching for a serial link manipulator, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2004), pp. 4802–4808.
- 牧田忍, 古荘純次, ロボットの機構評価に関する一考察 —最終効果器の実現可能速度を表す多面体を用いた場合—, *日本ロボット学会誌*, Vol. 20, No. 7 (2002), pp. 742–750.
- 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性, *日本ロボット学会誌*, Vol. 17, No. 6 (1999), pp. 887–895.
- Minami, M., Zhang, T., Yu, F., Nakamura, Y., Yasukura, O., Song, W., Yanou, A. and Deng, M., Reconfiguration manipulability analyses for redundant robots in view of structure and shape, *Proceedings of International Conference of SCIS & ISIS* (2010), pp. 971–976.
- Naksuk, N. and Lee, C. S. G., Zero moment point manipulability ellipsoid, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2006), pp. 1970–1975.
- 内山勝, 清水邦敏, 箱守京次郎, ヤコビ行列によるロボットアームの機構評価, *計測自動制御学会論文集*, Vol. 21, No. 2 (1985), pp. 190–196.
- Yoshida, K., Hata, N., Oh, S. and Hori, Y., Extended manipulability measure and application for robot arm equipped with bi-articular driving mechanism, *Proceedings of the Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)* (2009), pp. 3083–3088.
- 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 (1984), pp.587–592.
- Yoshikawa, T., Manipulability of robotic mechanisms, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 4, No. 2 (1985a), pp. 3–9.
- Yoshikawa, T., Dynamic manipulability of robot manipulators, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Vol. 2 (1985b), pp. 1033–1038.
- 吉川恒夫, ロボット制御基礎論 (1988), コロナ社.

References

- Asada, H., A geometrical representation of manipulator dynamics and its application to arm design, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 105, No. 3 (1983), pp. 131–135.
- Chinacchio, P., A new dynamic manipulability ellipsoid for redundant manipulators, *Robotica*, Vol. 18, No. 4 (2000), pp. 381–387.
- Kobayashi, Y., Minami, M., Yanou, A. and Maeba, T., Dynamic reconfiguration manipulability analyses of redundant robot and humanoid walking, *Proceedings of the 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)* (2012), pp. 16–18.
- Kobayashi, Y., Minami, M., Yanou, A. and Maeba, T., Dynamic reconfiguration manipulability analyses of humanoid bipedal walking, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2013), pp.

4764–4769.

- Koepe, R. and Yoshikawa, T., Dynamic manipulability analysis of compliant motion, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (1997), pp. 1472–1478.
- Kurazume, R. and Hasagawa, T., Impedance matching for a serial link manipulator, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (2004), pp. 4802–4808.
- Makita, S. and Furusho, J., Consideration of evaluation of robot arm mechanism -information from polyhedron which means possible velocity of end effector-, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 20, No. 7 (2002), pp. 742–750 (in Japanese).
- Minami, M., Naitoh, Y. and Asakura, T., Avoidance manipulability for redundant manipulators, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 17, No. 6 (1999), pp. 887–895 (in Japanese).
- Minami, M., Zhang, T., Yu, F., Nakamura, Y., Yasukura, O., Song, W., Yanou, A. and Deng, M., Reconfiguration manipulability analyses for redundant robots in view of structure and shape, Proceedings of International Conference of SCIS & ISIS (2010), pp. 971–976.
- Naksuk, N. and Lee, C. S. G., Zero moment point manipulability ellipsoid, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (2006), pp. 1970–1975.
- Uchiyama, M., Shimizu, K. and Hakomori, K., Performance evaluation of robotic arms using the jacobian, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 21, No. 2 (1985), pp. 190–196 (in Japanese).
- Yoshida, K., Hata, N., Oh, S. and Hori, Y., Extended manipulability measure and application for robot arm equipped with bi-articular driving mechanism, Proceedings of the Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON) (2009), pp. 3083–3088.
- Yoshikawa, T., Control of robots with redundancy, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.2, No.6 (1984), pp.587–592 (in Japanese).
- Yoshikawa, T., Manipulability of robotic mechanisms, The International Journal of Robotics Research, Vol. 4, No. 2 (1985a), pp. 3–9.
- Yoshikawa, T., Dynamic manipulability of robot manipulators, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Vol. 2 (1985b), pp. 1033–1038.
- Yoshikawa, T., Foundations of Robot Control (1988), Corona Publishing Co., LTD. (in Japanese).