

運動量保存に基づく柔軟ベース上冗長マニピュレータの ダイナミック特異点通過追従制御

Momentum Conservation based Path Tracking Dynamic Singularities With a Flexible-Base Redundant Manipulator.

○原 直行, 金宮 好和, 佐藤 大祐 (東京都市大学)

○ Naoyuki Hara, Yoshikazu Kanamiya, Daisuke Sato (Tokyo City University)

Abstract: High-speed path tracking with a kinematically redundant manipulator mounted on a flexible base is addressed. Thereby, possible vibrations of the base are to be suppressed. In general, the presence of kinematic redundancy allows these two subtasks to be performed simultaneously. In practice, however, this can be done only within very limited areas of workspace, separated by singularity loci, which change dynamically while the end-effector tracks the desired path. To avoid controller performance degradation in the neighborhood of such dynamic singularities, and to allow transitions between the distinct workspace areas through singularity boundaries, we propose here a new method for reactionless motion generation within a specified neighborhood of the singularity. In contrast to previous works, this method makes use of a nonzero coupling momentum which is conserved upon entering the neighborhood.

1 緒言

柔軟ベース上ロボットは、核廃棄物処理 [1][2] や宇宙ロボット工学の分野で広く研究されている。このようなロボットは、梁の長い (マクロ) マニピュレータの先端に梁の短い (ミニ) マニピュレータ固定された、マクロミニマニピュレータシステムとして知られている。宇宙ロボット分野での例として、国際宇宙ステーション (International Space Station: ISS) に搭載されている、カナダのカナダアーム 2 (Space Station Remote Manipulator System: SSRMS) + デクスター (Dexter) や、日本のロボットアーム (Japan Experiment Module Remote Manipulator System: JEM-RMS) + 子ロボット (Small Fine Arm: SFA) がある。また、柔軟ベース上ロボットは、工業用ロボット [4] や人型ロボット [5][6] の分野においても研究が進められている。

柔軟ベース上ロボットは、柔軟ベースとロボット間の動力学的干渉を扱うため、制御の視点から興味深い研究である。動力学的問題としては、ロボットの動作により得られるレンチ (力とモーメント) が、柔軟ベース部に対し外乱として働き、振動を誘発させる問題が存在する。発生した振動により、ロボットの先端位置精度を劣化させ、やシステムの不安定性を招く。この問題に関する研究は、多数存在し、(A) 慣性緩衝による、振動抑制制御のみを扱った研究 [7]–[11]、(B) 柔軟ベース部への外乱を最小にするための指令生成 [12]、(C) 振動が存在する上でのマニピュレータ先端制御 [13][14] などがあげられる。

我々の研究では、柔軟ベース上マニピュレータの目標軌道追従について考慮した。これにより、柔軟ベース上に対する外乱を避けるための有力な手法の一つが、無反動動作生成および制御を提案している。[15] では、元々フリーフ

ローティングスペースロボットのために研究されていた反動零空間法 [16] を用いることでこれを実現している。

しかしながら、反動零空間により課せられる拘束条件により、マニピュレータの作業を縮小させることが判明した。この問題を緩和するため、冗長自由度による振動抑制制御のみでの先端追従性能について検討した [17][18]。この結果、マニピュレータ先端の動作が柔軟ベース部の振動を招く一方で、最終的には、発生した振動を抑制可能であることを示した。

上記の様な利点がありながら、振動抑制制御を制約として追加した場合、キネマティック特異点を含むダイナミック特異点が現れる。これも、過去にフリーフローティングスペースロボットに関する研究で扱われている [19]。従来の制御下では、このような特異点付近での安定性は保証されていない。特に、特異点回避経路計画などは、特異点問題を扱うための様々な手法が研究されている。しかし、ここで最もよく扱われているのは、キネマティック特異点に対する手法であり、ダイナミック特異点においては、回避に関する有効な手段はない。また、キネマティック特異点回避は、ダイナミック特異点に対し有効ではない。なぜなら、キネマティック特異点と比べ、ダイナミック特異点は作業範囲全域に存在し、またマニピュレータ先端の位置に関わらず、その姿勢により特異点の分布を変化させる特徴を持つためである。つまり、特異点回避を考慮した経路計画は、非常に難しい。

そこで我々は、[20] において特異点通過可能な手法を提案した。そこでは、ダイナミック特異点付近で振動抑制制御を単に切ること、安定性を確保可能であることを示した。しかしこれは同時に、ダイナミック特異点付近で振動

を許す結果を生み、特に、比較的速い動作においては、滑らかな追従を達成できなかった。

我々の本稿における研究目的は、ダイナミック特異点を通過する経路において柔軟ベース部への過大な反動がなく、かつ比較的速い動作上での追従可能な制御の向上である。従って、安定性を補償し、かつ滑らかな動作とするべきである。我々は、ダイナミック特異点を通過するため、運動量保存制御を用いるこれにより、柔軟ベース部へ反動ないしダイナミック特異点通過可能であることを示す。またこの本質が、非零初期状態上での無反動動作生成および制御であることを述べる。

2 柔軟ベース上マニピュレータの動力学タスク

本論文では、理想的な完全モデルを仮定し、また適切な制御を設計するため、モデルベースとする。モデルの不確かさやロバスト性に関する問題は、ここでは扱わない。

2.1 運動方程式

柔軟ベース上マニピュレータの運動方程式は、以下のよう示される [15]。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_b & \mathbf{H}_{bm} \\ \mathbf{H}_{bm}^T & \mathbf{H}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_b \\ \ddot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{c}_b \\ \mathbf{c}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{D}_b \mathbf{v}_b \\ \mathbf{D}_m \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b \Delta \xi_b \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、 $\Delta \xi_b \in \mathbb{R}^k$ は平衡点からの柔軟ベース部（以下ベース部）並進および姿勢変位、 $\mathbf{v}_b = [\mathbf{v}_b^T \ \boldsymbol{\omega}_b^T]^T$ はベース部先端のツイスト（並進および角速度）、 $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$ はマニピュレータの一般座標系である。 $\mathbf{H}_b(\Delta \xi_b)$ 、 \mathbf{D}_b 、 $\mathbf{K}_b \in \mathbb{R}^{k \times k}$ は、それぞれベース部の慣性項、粘性項、剛性項、 $\mathbf{H}_m(\mathbf{q})$ 、 $\mathbf{D}_m \in \mathbb{R}^{n \times n}$ は、それぞれマニピュレータ部の慣性項、関節粘性項である。 $\mathbf{H}_{bm}(\Delta \xi_b, \mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{k \times n}$ は干渉慣性行列である。下付き文字 $(\cdot)_{bm}$ はベース部とマニピュレータ部の干渉を意味する¹。 $\mathbf{c}_b(\Delta \xi_b, \mathbf{q}, \mathbf{v}_b, \dot{\mathbf{q}})$ 、 $\mathbf{c}_m(\Delta \xi_b, \mathbf{q}, \mathbf{v}_b, \dot{\mathbf{q}})$ は速度依存項を、 $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$ は関節トルクを示す。また、ベースおよびマニピュレータ部ともに、外乱がないものとする。

2.2 動力学タスクの定式化

本節では、マニピュレータ先端とベース反力を同時に制御すること、またそれに伴い現れる、ダイナミック特異点の存在について示す。まず、ベース部について考える。ベース部の運動方程式は、(1) より以下となる。

$$\mathbf{H}_b \dot{\mathbf{v}}_b + \mathbf{D}_b \mathbf{v}_b + \mathbf{K}_b \Delta \xi_b = -\mathcal{W}_{bm} \quad (2)$$

式中、右辺は負荷レンチであり、ベースに対するマニピュレータ動作による反レンチである。この負荷レンチは、以下の式で示される。

$$\mathcal{W}_{bm} = \mathbf{H}_{bm} \ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{H}}_{bm} \dot{\mathbf{q}} \quad (3)$$

ここではベース部の変位が小さいと仮定し、 $\mathbf{c}_b \approx \dot{\mathbf{H}}_{bm} \dot{\mathbf{q}}$ とする。ベース部は \mathcal{W}_{bm} を通し、マニピュレータ動作による

¹(\cdot)_m および (\cdot)_b、(\cdot)_e、(\cdot)_c は、マニピュレータ部、ベース部、マニピュレータ先端、マニピュレータ重心を意味する。

影響を受ける。ここでは、ベース部に掛かる負荷レンチであるため、ベース負荷レンチと呼ぶ。ベース負荷レンチは、ベース部座標系からのマニピュレータ運動量に関する時間微分として表すことができる。

$$\mathcal{L}_{bm} = \left[\mathbf{r}_c \times m_{tot} \dot{\mathbf{r}}_c + \sum_{j=1}^n (\mathbf{I}_j \boldsymbol{\omega}_j + \mathbf{r}_j \times m_j \dot{\mathbf{r}}_j) \right] \quad (4)$$

\mathbf{r}_c はマニピュレータ重心の位置である。また、 \mathbf{I}_j 、 $\boldsymbol{\omega}_j$ 、 m_j 、 \mathbf{r}_j は、それぞれリンク j の慣性、角速度、質量、重心位置を示す。また、 m_{tot} はマニピュレータ全質量を示す。

次に、柔軟ベース上マニピュレータ先端ツイスト $\mathbf{v}_e = [\mathbf{v}_e^T \ \boldsymbol{\omega}_e^T]^T \in \mathbb{R}^m$ の時間微分を示す。

$$\dot{\mathbf{v}}_e = \mathbf{J}_e \ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}_e \dot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{v}}_b \quad (5)$$

$\mathbf{J}_e(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ は先端ヤコビアンである。

ここで、マニピュレータ先端とベース負荷レンチを同時に制御することを考える。マニピュレータ先端およびベース負荷レンチと関節角加速度の関係を、(3) を含め以下の様に示す。

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_e \\ \mathcal{W}_{bm} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{A}} \dot{\mathbf{q}} + \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_b \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中、 $\mathbf{A} = [\mathbf{J}_e^T \ \mathbf{H}_{bm}^T]^T \in \mathbb{R}^{(m+k) \times n}$ である。 $m+k \leq n$ と仮定した場合、関節角加速度は以下の様になる。

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{A}^+ \left(\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_e \\ \mathcal{W}_{bm} \end{bmatrix} - \dot{\mathbf{A}} \dot{\mathbf{q}} - \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_b \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \right) + \mathcal{N}_A \quad (7)$$

式中、 $(\cdot)^+$ は擬似逆行列を示す。

2.3 ダイナミック特異点

ダイナミック特異点は、 $\det(\mathbf{A}\mathbf{A}^T) = 0$ となる場合を示し、マニピュレータ先端とベース負荷レンチを同時に制御する場合に現れる。制御法が (7) のような関節角加速度に関する場合、 \mathbf{A} の特異点付近では、全ての制御性能が必然的に低下し、システムが不安定になる可能性がある。またこの特異点は、 $\det(\mathbf{J}_e \mathbf{J}_e^T) = 0$ となるキネマティック特異点の集合を含む。さらに、ダイナミック特異点は、マニピュレータ先端の作業範囲内に分布し、マニピュレータの姿勢変化により連続的に変化する性質を持つ。

また、 \mathcal{N}_A は \mathbf{A} の核を示し、冗長マニピュレータに存在するセルフモーションと呼ばれる動作を示す。この動作は、(7) の第 1 項目に対し、直交関係であるため直接影響を与えない。ただし、冗長自由度が無い ($m+k=n$) 場合は零となる。

我々は、マニピュレータ先端とベース負荷レンチを同時に制御しかつ分別して制御行うため、冗長自由度をうまく利用している [20]。この制御式は、(6) を用いることで以下の様に導出される。

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_e^+ \left(\dot{\mathbf{v}}_e - \dot{\mathbf{J}}_e \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{v}}_b \right) + \mathcal{N}_{J_e}(\mathcal{W}_{bm}) \quad (8)$$

式中、 $\mathcal{N}_{J_e}(\mathcal{W}_{bm})$ はベース負荷レンチを含む先端ヤコビアン零空間ベクトルである。これは、冗長自由度を利用し

たベース負荷レンチ制御を、第一項目に示すマニピュレータ先端制御に影響しない範囲で行う。もちろん、ダイナミック特異点が存在する。つまり、不安定要素となり得る。しかし、システムがダイナミック特異点を通過している間、零空間ベクトル $\mathcal{N}_{J_e}(\mathcal{W}_{bm})$ を (8) より取り除くだけで、軌道追従中の不安定性を回避可能な制御を導き出すことが可能である。また我々は、 $\mathcal{W}_{bm} = -\mathbf{G}_b \boldsymbol{\nu}_b$ (\mathbf{G}_b は正定値行列) とし、ベース部の動力学式 (2) に追加することで、ベース負荷レンチを、追加ダンパとしてを用いている。このように、マニピュレータのセルフモーションによる反力をベース部の減衰成分として用いることで、振動抑制制御を可能とする。これについては次節で述べる。

3 動力学タスクの補償制御

前節で述べてきたように、我々の提案する制御では、マニピュレータ先端制御と同時に動力学的な制御を行う。動力学的な制御によるタスクは、ベース負荷レンチを考慮することで実現できる。本節では、前節で示した振動抑制制御および次節で述べる運動量保存制御が、ベース負荷レンチを用いた補償器として表現可能であることを以下に示す。以下に制御されるベース負荷レンチの式を示す。

$$\mathcal{W}_{bm}^r = \mathbf{K}(\mathbf{a}^d - \mathbf{a}) \quad (9)$$

(o)^r および (o)^d はそれぞれ、指令値および目標値、 \mathbf{K} は正定値行列、 \mathbf{a} は制御方法により決定される状態変数である。 \mathbf{K} および \mathbf{a} を適切に選ぶことで、以下に示す振動抑制制御や運動量保存制御が表現できる。

3.1 振動抑制制御

振動抑制制御は、ベース部の変位や変位速度などを考慮し、これらを零とするため必要なマニピュレータ反力を動力学的特性より求める手法である。まず、振動抑制制御はベース部の速度を状態変数として用い $\mathbf{a} = \boldsymbol{\nu}_b$ 、 $\mathbf{K} = \mathbf{G}_b$ とすることで以下となる。

$$\mathbf{W}_{bm}^r = \mathbf{G}_b(\boldsymbol{\nu}_b^d - \boldsymbol{\nu}_b) \quad (10)$$

振動抑制制御においては、ベース部振動を抑制するため速度を零とする制御を行う。よって、 $\boldsymbol{\nu}_b^d = \mathbf{0}$ であるため、 $\mathcal{W}_{bm} = -\mathbf{G}_b \boldsymbol{\nu}_b$ を得る。 $\mathcal{N}_{J_e}(\mathcal{W}_{bm})$ は、マニピュレータ先端位置に影響を与えない動作内で振動抑制制御を実現する。

3.2 運動量保存制御

次に、運動量保存制御ではマニピュレータの運動量および角運動量を状態変数として用いる。よって、 $\mathbf{a} = \mathcal{L}_{bm}$ 、 $\mathbf{K} = \mathbf{K}_{bm}$ とし、以下を得る²。

$$\mathcal{W}_{bm}^r = \mathbf{K}_{bm}(\bar{\mathcal{L}}_{bm}^d - \mathcal{L}_{bm}) \quad (11)$$

ただし、 $\bar{\mathcal{L}}_{bm}^d$ はサンプルホールド制御を採用する。運動量保存制御においては、運動量が目標一定運動量となる ($\bar{\mathcal{L}}_{bm}^d = \mathcal{L}_{bm}$) 場合、 $\mathcal{W}_{bm} = \mathbf{0}$ となる。よって、ベース部に負荷レンチを与えない、非零初期状態上での無反動動作制御が可能となる。

²これ以降、上付きバー (o) を一定値と定義する。

4 ダイナミック特異点での切り替え制御

我々は、ダイナミック特異点を安定して通過可能であることを示すと同時に、比較的速いマニピュレータ動作による反力が、ベース部を振動させることを示した [20]。ベース部の不安定性は、マニピュレータ運動量の時間変化が大きい場合に悪化する。すなわち、不安定を回避するためには、この変化量を抑えればよい。我々は、ダイナミック特異点を通過させるためにマニピュレータを動作させながらも、この変化量を抑えるため運動量保存制御を用いる。このような手法は、(11) によりベース負荷レンチが零となることで実現可能となる。ただし、我々の主な制御手法は振動抑制制御とマニピュレータ先端制御を同時に行うことであり、(8) を用いる。つまり、ダイナミック特異点外では振動抑制制御を用いる。よって、ダイナミック特異点内へ進入する際に、(8) の第二項目を振動抑制制御 ($\mathcal{W}_{bm} = -\mathbf{G}_b \boldsymbol{\nu}_b$) から運動量保存制御 ($\mathcal{W}_{bm} = \mathbf{0}$) へ切り替える必要がある。そして、ダイナミック特異点通過後には、運動量保存制御から振動抑制制御へ戻す必要がある。

以上を含めて、指令関節角加速度は、(8) を用いて以下の式より得る。

$$\ddot{\mathbf{q}}^r = \mathbf{J}_e^+ \left(\dot{\boldsymbol{\nu}}_e^r - \mathbf{J}_e \dot{\mathbf{q}} - \dot{\boldsymbol{\nu}}_b \right) + \mathcal{N}_{J_e}(\mathcal{W}_{bm}^r) \quad (12)$$

ただし、

$$\dot{\boldsymbol{\nu}}_e^r = \dot{\boldsymbol{\nu}}_e^d + \mathbf{K}_d(\boldsymbol{\nu}_e^d - \boldsymbol{\nu}_e) + \mathbf{K}_p(\boldsymbol{\xi}_e^d - \boldsymbol{\xi}_e) \quad (13)$$

$$\mathcal{W}_{bm}^r = \begin{cases} \mathbf{K}_{bm}(\bar{\mathcal{L}}_{bm}^d - \mathcal{L}_{bm}) & \text{if } t_{in} \leq t \leq t_{out} \\ -\mathbf{G}_b \boldsymbol{\nu}_b & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (14)$$

である。式中、 $\boldsymbol{\xi}_e$ はマニピュレータ先端の位置および姿勢、 \mathbf{K}_p および \mathbf{K}_d は、正定値のフィードバックゲイン行列である。 t_{in} および t_{out} はダイナミック特異点近傍へ入る時点と出る時刻を定義する。 t_{in} の時点で、指令値 \mathcal{W}_{bm}^r を振動抑制制御より運動量保存制御へ切り替える。また、逆も同様である。

(12) において、ダイナミック特異点のためにすべての冗長自由度が失われた場合、 $\mathcal{N}_{J_e}(\mathcal{W}_{bm}^r)$ は不安定な状態に陥り、利用できない。このため、ダイナミック特異点内での運動量保存制御は、不可能となる。この問題については、次節において具体的な例とともに解決手法を示す。

5 平面における柔軟ベース上冗長 3 リンクマニピュレータ

本節では、1 自由度柔軟ベース上の冗長 1 自由度を有する平面 3 リンクマニピュレータの制御について述べる。本モデル (Fig. 1 参照) では、ダイナミック特異点付近でない場合、マニピュレータ先端制御 (2 自由度 = m) と振動抑制制御 (1 自由度 = k) を同時に制御可能である (Fig. 2 (a))。しかし、ダイナミック特異点においては、重心の動作は一方方向へ制限され、動作範囲も縮小する (Fig. 2 (b))。つまり、振動抑制制御の性能が劣化する。一方で、ダイナミック特異点へ入る前の振動を考慮しない場合、重心の速度を一定として動作させることで運動量を保存することができ。つまり、ベース部への反動は零となる (Fig. 2 (c))。

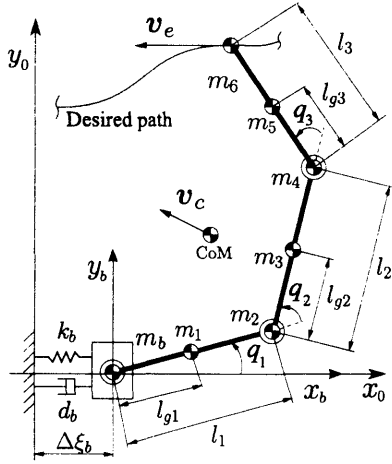


Fig. 1: Model of a planar three-link manipulator on a flexible base.

これにより、特異点を通過する場合においても、振動を発生させずに動作可能となる。

以下では、上述についてシミュレータの制御について示す。まず、計算トルク法を用いるため (1) よりマニピュレータ部の運動方程式を抜き出す。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{H}_m \ddot{\mathbf{q}}^r + \mathbf{h}_{bm}^T \dot{v}_{bx} + \mathbf{D}_m \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}_m \quad (15)$$

$\mathbf{h}_{bm} \in \mathbb{R}^{1 \times 3}$ は干渉慣性行列である。モデルが平面上であるため、これ以降で扱う変数を $\boldsymbol{\xi} \rightarrow \mathbf{x}$, $\boldsymbol{\nu} \rightarrow \mathbf{v}$, $\mathbf{L} \rightarrow \mathbf{l}$, $\mathbf{W} \rightarrow \mathbf{w}$ とする。また以下では、ダイナミック特異点の外側と内側にわけてそれぞれの制御式を示す。

5.1 ダイナミック特異点付近の外側

指令関節角加速度は、(12) より以下となる。

$$\ddot{\mathbf{q}}^r = \mathbf{J}_e^+ \left(\dot{\mathbf{v}}_e^r - \dot{\mathbf{J}}_e \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{v}}_b \right) + \beta \mathbf{n} \quad (16)$$

式中、 $\mathbf{v}_e = [v_{ex} \ v_{ey}]^T$ および $\mathbf{v}_b = [v_{bx} \ 0]^T$ は、それぞれマニピュレータ部およびベース部の速度ベクトルである。また、 $\mathbf{n}(\mathbf{q}, w_{bm}^r)$ は、冗長 1 自由度を用いてベース負荷レンチ制御を可能とする零空間ベクトルである。 \mathbf{n} 中の指令値 $w_{bm}^r = g_b v_{bx}$ は、振動抑制制御を行う。ただし、 g_b は追加したベース部粘性係数（ここでは、振動抑制ゲインと呼ぶ）、 v_{bx} は歪みゲージなどから得られるベース速度である。 β は、任意のスカラーである。 $\beta = 1/\det \mathbf{A}$ （ただし、 $\mathbf{A} = [\mathbf{J}_e^T \ \mathbf{h}_{bm}^T]^T$ ）を満たす時、振動抑制制御性能が最大となる。ただし、ダイナミック特異点付近へ進入した場合、 $\beta = 0$ とし振動抑制制御を切る。

マニピュレータ先端の指令値は、PD 制御を用い以下で得られる。

$$\dot{\mathbf{v}}_e^r = \dot{\mathbf{v}}_e^d + \mathbf{K}_d(\mathbf{v}_e^d - \mathbf{v}_e) + \mathbf{K}_p(\mathbf{x}_e^d - \mathbf{x}_e) \quad (17)$$

式中、 $\mathbf{K}_d = \text{diag}[k_d \ k_d]^T$ および、 $\mathbf{K}_p = \text{diag}[k_p \ k_p]^T$ はフィードバックゲイン行列である。 $\mathbf{x}_e^d = \mathbf{x}_e^d(s)$ は、軌道パ

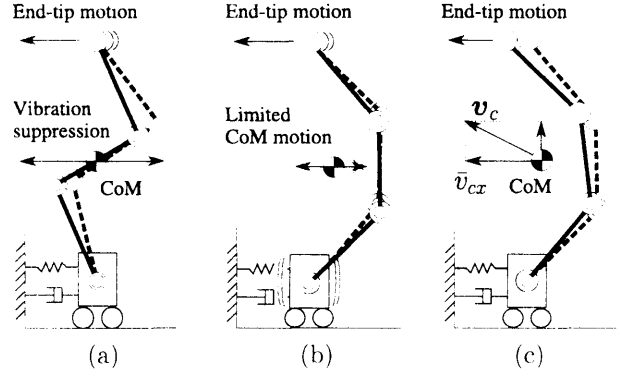


Fig. 2: Subtask performance capability: (a) simultaneous trajectory tracking and vibration suppression is possible away from a singularity; (b) in the neighborhood of a dynamic singularity, vibration suppression is impossible due to a unilateral constraint on the CoM motion; (c) in the neighborhood of a dynamic singularity, simultaneous path tracking and momentum conservation is possible.

ラメータ $s = s(t)$ により適切に決定されるマニピュレータ先端の関数である。 $\mathbf{x}_e = [x_{ex} \ x_{ey}]^T$ は、関節角度と順運動学の関係から得られるマニピュレータ先端の位置である。この方法を用いて、ダイナミック特異点へ進入した時も、次節で述べる再軌道パラメータ決定が可能となる。

5.2 ダイナミック特異点付近の内側

ダイナミック特異点へ進入すると、振動抑制制御の性能は劣化する。前節で示した様に、例えば Fig. 2 (b) に示す姿勢の場合、重心の動作は一方に制限され、制御可能範囲が縮小する。一方で、運動量保存制御では Fig. 2 (b) の様に重心の速度を一定 (\bar{v}_{cx}) とすることで、ベース部に反動を与えず重心の作業範囲を得ることができる。ここで、重心速度と反力の関係を以下に示す。

$$w_{bm}/m_{tot} = \dot{v}_{cx} = \mathbf{J}_{cx} \ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}_{cx} \dot{\mathbf{q}} \quad (18)$$

式中、 $\mathbf{J}_{cx} = \mathbf{h}_{bm}/m_{tot}$ であり、 x 軸方向（並進方向）に対し成り立つ。よって、運動量についても以下の式が成り立つ。

$$\bar{\mathbf{l}}_{bm} = m_{tot} \bar{v}_{cx} \quad (19)$$

しかし、マニピュレータの先端制御と運動量保存制御は同時に行うことができない。なぜなら、ダイナミック特異点を通過する場合に冗長 1 自由度を失うためである。つまり、全ての冗長自由度を失う。これにより、 $\mathbf{n}(\mathbf{q}, w_{bm}^r)$ は用いることができない。

この問題を緩和するために、我々は再軌道パラメータ化を提案する。この手法では、運動量保存制御により決定されるマニピュレータ先端速度を制御に用いる。(18) を考慮すると、加速度は以下の式でまとめられる。

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_{ey} \\ \dot{v}_{cx} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{q}} \quad (20)$$

Table 1: The model parameters.

m_b	0.4 kg	l_1	0.1 m
m_1	0.025 kg	l_2	0.1 m
m_2	0.285 kg	l_3	0.1 m
m_3	0.025 kg	l_{g1}	0.05 m
m_4	0.285 kg	l_{g2}	0.05 m
m_5	0.025 kg	l_{g3}	0.05 m
m_6	0.095 kg	I_1	0.0135 kgm ²
k_{b1}	191 N/m	I_2	0.0135 kgm ²
d_{b1}	0.33 Ns/m	I_3	0.00307 kgm ²

式中, $\mathbf{J} = [\mathbf{J}_{ey} \ \mathbf{J}_{cx}]^T \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$ は, マニピュレータ先端と重心で構成された偏導関数である. よって, 求める指令関節角加速度は, 以下となる.

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^+ \left(\begin{bmatrix} \dot{v}_{ey} \\ \dot{v}_{cx} \end{bmatrix} - \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}} \right) + \mathcal{N}_{\mathbf{J}} \quad (21)$$

$\mathcal{N}_{\mathbf{J}}$ は \mathbf{J} の零空間ベクトルである. ただし, 制御目的と関係が無い場合用いる必要がない. 指令重心加速度は, (11) より以下となる.

$$\ddot{v}_{cx}^r = k_m(\ddot{v}_{cx}^d - v_{cx}) \quad (22)$$

式中, $\ddot{v}_{cx}^d = v_{cx}(t_{in})$ である. 重心速度の現在値は, 順運動学により関節角速度より得られる. 一方で, マニピュレータ先端の指令値は, 以下で得られる.

$$\ddot{v}_{ey}^r = \ddot{v}_{ey}^d + k_d(v_{ey}^d - v_{ey}) + k_p(x_{ey}^d - x_{ey}) \quad (23)$$

ただし, 上記制御は, $s = s(x_{ex}(t))$ の関係により得られる軌道パラメータに従う点に注意されたい.

5.3 シミュレーション条件および結果

3 自由度冗長マニピュレータのモデルパラメータの詳細は, Table 1 に示す. 初期姿勢は, $\mathbf{q} = [0.0 \ 20.0 \ 20.0]^T$ deg, 目標軌道は, x 方向に平行とし, 初期姿勢の位置より負の方向とした. マニピュレータ先端目標軌道 $(x_e^d, v_e^d, \ddot{v}_e^d)$ は, 5 次補間法によるスプライン関数 $s(t)$ により定義した. また, スプライン関数の初期および最終の状態は, それぞれのシミュレーションによりそれぞれ定義した. フィードバックゲインは, それぞれ $\mathbf{K}_d = \text{diag} [2.0 \ 2.0] \times 10^2 \text{ s}^{-1}$, $\mathbf{K}_p = \text{diag} [2.0 \ 2.0] \times 10^4 \text{ s}^{-2}$, $\mathbf{K}_m = 2.0 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$, 関節の粘性係数は $\mathbf{D}_m = \text{diag} [0.05 \ 0.05 \ 0.05] \text{ Nms/rad}$, 振動抑制ゲインは $g_b = 10 \text{ Ns/m}$ とした. 本モデルでのダイナミック特異点近傍の定義を, t_{in} については, ベース部の加速度が $|\ddot{v}_{bi}| \geq a_{max}$ となる場合, また t_{out} については, ダイナミック特異点が $|\det(\mathbf{A}\mathbf{A}^T)| \geq d_{max}$ となる場合とした. それぞれの閾値は, $a_{max} = 0.2 \text{ m/s}^2$, $d_{max} = 1.5 \times 10^3 \text{ kg}^{-1}\text{m}^3$ と定義した. ただし, ダイナミック特異点へ進入時 t_{in} は, 前章で示した様に再軌道パラメータ生成を行い, また特異点近傍を通過した後も, t_{out} より滑らかな軌道を得るため, もう一度, 軌道パラメータの計算を行った. 本稿では, ダイナミック特異点の性質を示すため, 比較的遅い動作と速い動作に分けて, 計四つのシミュレーション結果を示す.

5.4 比較的遅い動作

まず, 最初の二つのシミュレーションでは, 9 s 間での軌道追従制御を行った. 結果は, それぞれ Figs. 3, 4 に示す. (a) の上段はマニピュレータ重心速度, 下段はベース部の偏位, (b) の上段は $\det \mathbf{A}$ を, 下段はその逆数である β を示す.

Fig. 3 より, 初期時点ではベース部変位がない. これは目標の加速度が比較的小さいためであり, また振動抑制制御を行っているためである. 一方, 5 s 付近よりベース部の振動が確認できる. この原因が, ダイナミック特異点付近であることは (b) より明確である. つまり, $\beta = 1/\det \mathbf{A}$ が過大な値となっている. ここで, ダイナミック特異点付近において振動抑制制御を切っていないことに注意されたい. また, β の符号が変わっていないことから, ダイナミック特異点を通過していないことがわかる. ダイナミック特異点付近でのベース部の振動問題を確認した一方で, 特異点付近から抜けた後, 瞬時に振動抑制可能であることが確認できる.

Fig. 4 の結果では, ベース部の振動がない状態でダイナミック特異点通過している. このシミュレーションでは, ダイナミック特異点付近で $\beta = 0$ とすることで振動抑制制御を切っている. これにより, ダイナミック特異点の影響による重心の過大な加速度を抑えられ, 結果ベース部の振動を発生させない.

Fig. 5 は, 直線軌道追従制御中に作業空間に現れるダイナミック特異点の分布を示している. 第 1 関節により媒介変数化しており, 第 2 関節を中心に分布し, 第 1 関節の角度によりその分布が変化する. 3 番目の図を除き, マニピュレータ先端位置が, 特異点の分布に接近している. Fig. 4 の (b) 下段と見比べることで $\det \mathbf{A}$ との関係が明確に分かる.

5.5 比較的速い動作

次の二つのシミュレーションは, スプライン関数の終了時間を 3.5 s と設定した. シミュレーション結果は, Figs. 6, 7 に示す. (a) および (b) は, 前のシミュレーション結果 (Figs. 3, 4) と同様の内容を示す. 追加されたグラフ (c) および (d) はそれぞれ, 関節の速度およびトルクを示す. また (e) の上段はマニピュレータ先端の y 方向位置エラー, 下段はマニピュレータ先端の x 方向における速度を示す.

Fig. 6 は, ダイナミック特異点付近で運動量保存制御を用いない場合の結果である. Fig. 7 と比べ, ダイナミック特異点付近において, ベース部に過大な外乱が確認できる. Fig. 3 で得られた振動とは性質が違い, 大きく変位していることがわかる. これは, Fig. 6 の (a) 上段より, 重心速度の急激な変化, つまり加速度が原因である. また (c) や (d) に見られる様に, ダイナミック特異点付近での振動抑制制御の切るタイミングに合わせて関節の速度やトルクが不安定になっていることも確認できる.

最後のシミュレーション (Fig. 4) では, ダイナミック特異点付近で, 振動抑制制御を切るのに代わり, 運動量保存制御を用いた. Figs. 6, 7 の (a) より, ベース変位が抑えられている. これにより, マニピュレータ重心速度を一定とすることで, ベース部の変位を最小に抑えられる事を確認した. また, ダイナミック特異点を通過していることも (b)

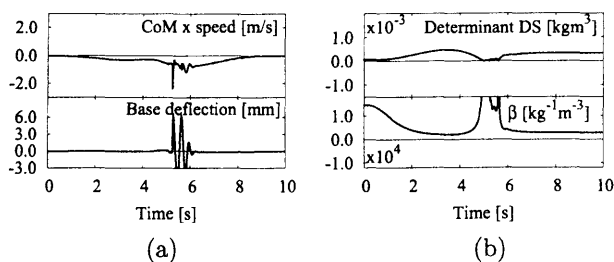


Fig. 3: Low-speed path tracking without switching off vibration suppression around the singularity. Significant base vibrations are induced. The singularity could not be crossed.

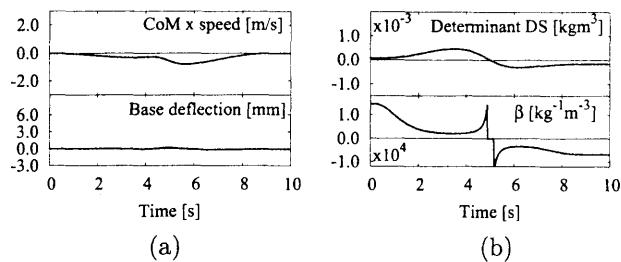


Fig. 4: Low-speed path tracking without vibration suppression around the singularity. The base deflects insignificantly. The singularity could be crossed.

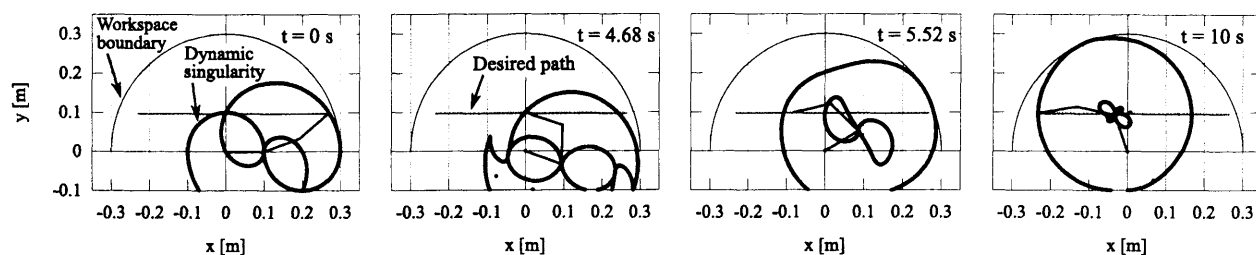


Fig. 5: Snapshots showing the variation of the dynamic singularities loci during path tracking with a relatively low speed. The curves are parameterized by the first joint angle and are centered, therefore, at the second joint. The green line is the desired path.

より確認できた。両結果の (c) および (d) をそれぞれ比べると後者の結果の方が、より滑らかに動作していることがわかる。Fig. 7 (e) は、マニピュレータ先端軌道が運動量保存制御に適応した軌道パラメータに修正されていることが確認できる。

6 結言

本稿では、マニピュレータの先端と動力学タスクを同時に行うことでダイナミック特異点が存在することを述べた。また、動力学タスクを利用した補償器として、振動抑制制御や運動量保存制御を示した。そして、これらの平面における柔軟ベース上冗長マニピュレータを用いて、ダイナミック特異点を通過可能な高速追従制御の可能性について示し、また同時に、ベース部の過大な振動を抑えられることを示した。この結果より、ダイナミック特異点における運動量保存制御の性能を見出したといえる。我々は、上記性能を明確にすることが、柔軟ベース上ロボットのサブタスクの動作生成を行う際に、重要な提案であると考えている。一方で、モデルの不確実性やロバスト性についても今後の課題であると考えている。

参考文献

- [1] J. F. Jansen, S. M. Babcock, R. L. Kress, B. L. Burks and W. Hamel: "Long-reach manipulation for waste storage tank remediation," Proceeding of the ASME Winter Annual Meeting, Atlanta, GA, USA, 67/73 (1991)
- [2] D. S. Kwon, D. H. Hwang, S. M. Babcock and B. L. Burks: "Input shaping filter methods for the control of structurally flexible, long-reach manipulators," Proceed-

ing of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego, CA, USA, 3259/3264 (1994)

- [3] M. A. Torres and S. Dubowsky: "Path-planning in elastically constrained space manipulator systems," Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Atlanta, GA, USA, 812/817 (1993)
- [4] J. Ueda and T. Yoshikawa: "Robust arm configuration of manipulator mounted on flexible base," IEEE Transactions on Robotics, vol. 20, no. 4, 781/789 (2004)
- [5] J. Ueda, R. Oya, T. Ogasawara and T. Yoshikawa: "Solution of human-like redundant manipulator mounted on flexible body for task-space feedback control," Proceeding of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 1429/1434 (2003)
- [6] T. Wimböck, D. N. Nenchev, A. Albu-Schäffer and G. Hirzinger: "Experimental study on dynamic reactionless motions with DLR's humanoid robot Justin," Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Louis, USA, 12/15 (2009)
- [7] S. H. Lee and W. J. Book: "Robot vibration control using inertial damping forces," 8th CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics, and Control, Cracow, Poland, 252/259 (1990)
- [8] M. A. Torres, S. Dubowsky and A. C. Pisoni: "Vibration control of deployment structures' long-reach manipulators: the P-PED method," Proceeding of the 1996 IEEE International Conference Robotics and Automation, Minneapolis, MN, USA, 2498/2504 (1996)
- [9] Y. J. Lew and D. J. Trudnowski: "Vibration control of a micro/macro manipulator system," IEEE Control Systems Magazine, vol. 16, no. 1, 26/31 (1996)
- [10] I. Sharf: "Active damping of a large flexible manipulator with a short reach robot," Transaction of the ASME

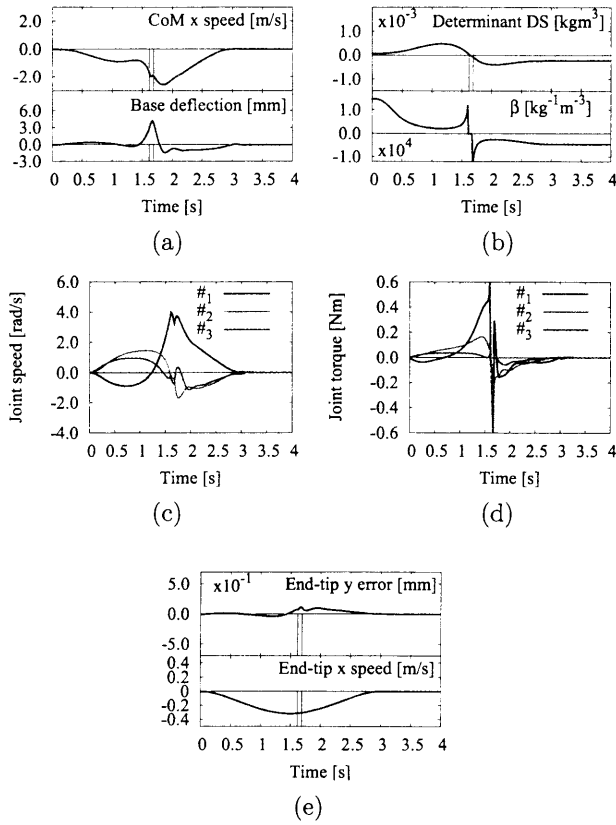


Fig. 6: High-speed path tracking without momentum conservation around the singularity. The base deflects significantly due to the large acceleration of the CoM.

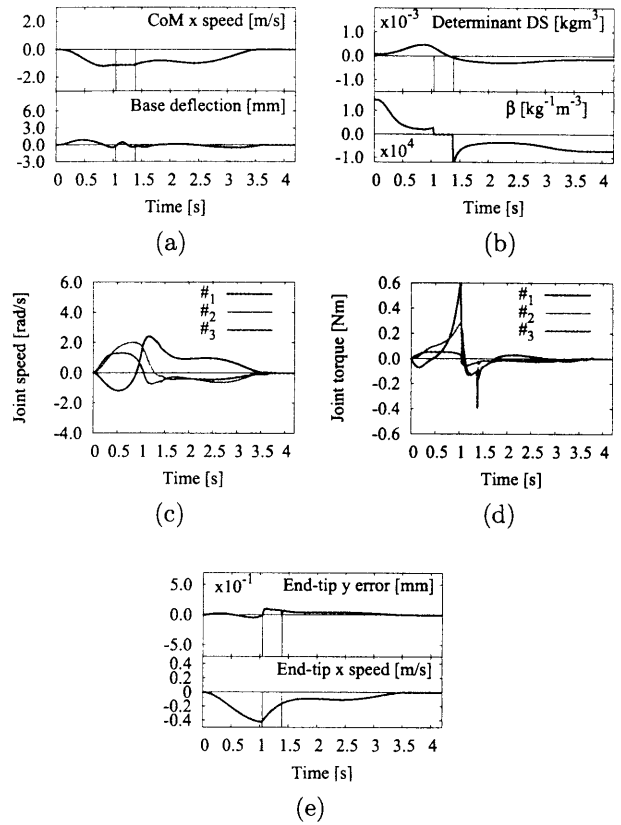


Fig. 7: High-speed path tracking with momentum conservation around the singularity. Trajectory reparameterization helped to ensure insignificant base deflection.

- Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 118, no. 4, 704/713 (1996)
- [11] S. Abiko and K. Yoshida: "An adaptive control of a space manipulator for vibration suppression" Proceeding of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Canada, 2167/2172 (2005)
- [12] D. W. Cannon, D. P. Magee, W. J. Book and J. Y. Lew: "Experimental study on micro/macro manipulator vibration control." Proceeding of the IEEE International Conference Robotics and Automat, Minneapolis, Minnesota, 2549/2554 (1996)
- [13] R. H. Cannon, Jr. and E. Schmitz: "Initial experiments on the end-point control of a flexible one-link robot," The International Journal of Robotics Research, vol. 3, no. 3, 62/75 (1984)
- [14] C. Mavroidis, S. Dubowsky and V. Raju: "End-point control of long reach manipulator systems." Proceedings of the 9th World Congress on the Theory of Machine and Mechanisms Milano, Italy, 1740/1744 (1995)
- [15] D. N. Nenchev, K. Yoshida, P. Vichitkulsawat and M. Uchiyama: "Reaction null-space control of flexible structure mounted manipulator systems," IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol. 15, no. 6, 1011/1023 (1999)
- [16] D. N. Nenchev, K. Yoshida and Y. Umetani: "Introduction of redundant arms for manipulation in space." IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, Tokyo, Japan, 679/684 (1988)
- [17] Y. Fukazu, N. Hara, T. Hishinuma, D. Sato and Y. Kanamiya: "Pseudoinverse-based motion control of a redundant manipulator on a flexible base with vibration suppression," Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 20, no. 4, 621/627 (2008)
- [18] Y. Fukazu, N. Hara, Y. Kanamiya and D. Sato: "Reactionless resolved acceleration control with vibration suppression capability for JEMRMS/SFA," Proceeding of the IEEE International conference on Robotics and Biomimetics, Bangkok, Thailand, 1359/1364 (2009)
- [19] E. Papadopoulos and S. Dubowsky: "Dynamic singularities in free-floating space manipulators," contributed chapter in Space Robotics: Dynamics and Control, Y. Xu and T. Kanade, Eds. Boston, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 77/100 (1993)
- [20] N. Hara, Y. Fukazu, Y. Kanamiya and D. Sato: "Singularity-consistent torque control of a redundant flexible-base manipulator," Motion and Vibration Control: Selected Papers from MOVIC 2008, Dordrecht, Netherlands, Springer Netherlands, 103/112 (2008)