

反動零空間法に基づく冗長マニピュレータ先端の 位置と力のハイブリッド制御法の提案

半田陽一 原直行 金宮好和 (東京都市大学)

1. 緒言

マニピュレータに機の拭き掃除やドアの開閉、クラック回しなどの作業を行わせる場合、手先の位置制御と対象物に加える力制御を同時に満たすハイブリッド制御法が求められる。ハイブリッド制御法は、過去に多く研究されており、Khatib[1]は、マニピュレータの運動方程式を作業空間について定式化し選択行列を用いることで、分解加速度制御によるマニピュレータ先端の位置フィードバック制御と転置行列によるマニピュレータ先端の力制御を同時に満たしている。また、マニピュレータ先端ハイブリッド制御と非干渉な、マニピュレータの冗長自由度を利用した関節トルクの制御に成功している。また、上記に深く関係する研究として、Murrayら[2]が提唱する作業空間ダイナミクスがあげられる。これは、Khatibがマニピュレータ運動方程式のみに関する定式化を行なったのに対し、操作する対象物体の運動方程式を追加し定式化したものである。さらに、Khatibがマニピュレータ冗長自由度を関節トルク制御に用いているのに対し、Murrayらはマニピュレータ先端動作に影響しない、冗長自由度による内部動作¹を、作業空間に対し陽に拡張した新たな座標として定義し、運動の制御に用いている。

本稿では、上記と異なる新たなハイブリッド制御法を提案する。本ハイブリッド制御法は、宇宙で用いるフリーフローティングロボットの制御のために開発された反動零空間法 (Reaction Null-Space: RNS) [3] に基づき、マニピュレータと対象物の動力的干渉を利用する。過去の研究では、この動力的干渉を柔軟ベース上マニピュレータの制御で利用することで、反動零空間法の概念に由来する様々な制御手法を開発している。以下では、Khatibの提案するハイブリッド制御法と我々の提案する反動零空間法に基づくハイブリッド制御法を比較し、提案するハイブリッド制御法が、同等の性能を有することを示す。また、Khatibが用いたマニピュレータ冗長自由度の関節トルク制御と反動零空間法により得られるセルフモーションの制御の、マニピュレータ先端のハイブリッド制御法に対する影響について議論する。

2. Khatibのハイブリッド制御法

一般的に、 n 自由度マニピュレータの運動方程式は、

$$M_l \ddot{\theta} + c_l + g_l = \tau \quad (1)$$

と示すことができる。式中、 $M_l \in \mathbb{R}^{n \times n}$ はマニピュレータの慣性行列、 $c_l \in \mathbb{R}^n$ はマニピュレータのコリオリ遠心力項、 $g_l \in \mathbb{R}^n$ はマニピュレータの重力項、 $\tau \in \mathbb{R}^n$ は関節トルク、 $\theta \in \mathbb{R}^n$ は関節角度である。た

¹セルフモーションともよぶ。

だし、本稿では外乱がない理想的な完全モデルを仮定し、モデル誤差や時間遅れによるロバスト安定性の問題は扱わない。

ここで、上記マニピュレータ運動方程式をマニピュレータ先端の作業空間について定式化する。ただし、ベース部を A 部、マニピュレータ先端部を B 部と称する。 m 自由度の作業空間における、 B 部の順運動学を以下に示す。

$$\dot{V}_B = J_{Bl} \ddot{\theta} + \dot{J}_{Bl} \dot{\theta} \quad (2)$$

式中、 $\dot{V}_B \in \mathbb{R}^m$ はマニピュレータ先端の加速度、 $J_{Bl} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ は先端ヤコビ行列である。 B 部の負荷力 $\mathcal{F}_B^{imp} \in \mathbb{R}^m$ とマニピュレータ関節トルクの関係は、

$$\tau = J_{Bl}^T \mathcal{F}_B^{imp} \quad (3)$$

である。ただし $(\circ)^{imp}$ は負荷力を表す。式 (2)、(3) を用いて、冗長マニピュレータの運動方程式として式 (1) を以下の式のように書き換えられる。

$$M_{Kh} \dot{V}_B + C_{Kh} + \mathcal{G}_{Kh} = \mathcal{F}_B^{imp} \quad (4)$$

$$M_{Kh} = (J_{Bl} M_l^{-1} J_{Bl}^T)^{-1}$$

$$C_{Kh} = -M_{Kh} \dot{J}_{Bl} \dot{\theta} + \bar{J}_{Bl}^T c_l$$

$$\mathcal{G}_{Kh} = \bar{J}_{Bl}^T g_l$$

$$\bar{J}_{Bl} = M_l^{-1} J_{Bl}^T M_{Kh}$$

ただし、 \bar{J}_{Bl} は慣性重み付き一般化逆行列である。

これ以降、 $n > m$ であると仮定し、冗長マニピュレータについて議論する。この場合、冗長マニピュレータ先端の力に非干渉な、式 (4) に基づく零空間ベクトル $(U - J_{Bl}^T \bar{J}_{Bl}^T) \tau_{any}$ が存在する。

$$\tau = J_{Bl}^T \mathcal{F}_B^{imp} + (U - J_{Bl}^T \bar{J}_{Bl}^T) \tau_{any} \quad (5)$$

式中、 U は単位行列、 $\tau_{any} \in \mathbb{R}^n$ は任意のトルクである。式 (4) の作業空間における運動方程式より、 B 部の位置制御に必要な力 \mathcal{F}_B^m と力制御に必要な負荷力 \mathcal{F}_B^a をそれぞれ求めると以下になる。

$$\mathcal{F}_B^m = M_{Kh} S \dot{V}_B^{ref} + C_{Kh} + \mathcal{G}_{Kh} \quad (6)$$

$$\mathcal{F}_B^a = (U - S) \mathcal{F}_B^{ref} \quad (7)$$

位置と力のハイブリッド制御は、 \mathcal{F}_B^m と \mathcal{F}_B^a を非干渉化するため、選択行列 $S \in \mathbb{R}^{m \times m}$ を用いる。これにより、制御に必要な力は $\mathcal{F}_B^{imp} = \mathcal{F}_B^m + \mathcal{F}_B^a$ で得られる。よって、式 (5)~(7) より、求める指令関節トルク値は以下となる。

$$\tau^{ref} = J_{Bl}^T M_{Kh} S \dot{V}_B^{ref} + J_{Bl}^T (U - S) \mathcal{F}_B^{ref} + (U - J_{Bl}^T \bar{J}_{Bl}^T) \tau_{any} + J_{Bl}^T (C_{Kh} + \mathcal{G}_{Kh}) \quad (8)$$

3. 反動零空間法に基づく新たなハイブリッド制御法の提案

本章では、冗長マニピュレータと対象物の動力学の干渉を利用したハイブリッド制御を提案する．ここで、柔軟ベース上冗長マニピュレータモデル [4] の柔軟ベースを A 部とし、また冗長マニピュレータ先端を B 部とする．提案するハイブリッド制御法の要は、 A 部を新たな冗長マニピュレータ先端として扱う点である．つまり、これまで扱ってきた柔軟ベースを冗長マニピュレータ先端と定義することで、新たな冗長マニピュレータ先端 (A 部) と冗長マニピュレータの動力学の干渉として扱うことができる．ただし、 B 部は、強力なばねとダンパで固定し固定ベースとして扱う．前章の Khatib では、 B 部を冗長マニピュレータ先端として扱っていることに注意されたい．

まず、 A 部と冗長マニピュレータの運動方程式を示す．

$$\begin{bmatrix} M_A & M_{Al} \\ M_{Al}^T & M_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_A \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_A \\ c_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_A \\ g_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_A^{rct} \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{BA}^T \\ J_{Bl}^T \end{bmatrix} F_B^{rct} \quad (9)$$

式中、 $M_A \in \mathbb{R}^{m \times m}$ は A 部周りにおけるシステム全体の慣性行列、 $M_{Al} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ は冗長マニピュレータと A 部の干渉慣性行列、 $C_A \in \mathbb{R}^m$ は A 部のコリオリ遠心力項、 $G_A \in \mathbb{R}^m$ は A 部の重力項、 $F_A^{rct} \in \mathbb{R}^m$ は A 部に加わる外力、 $F_B^{rct} \in \mathbb{R}^m$ は B 部に加わる外力であり、2 章の負荷力との違いに注意されたい． $v_A \in \mathbb{R}^m$ は A 部の速度、 $J_{BA} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ は B 部に与えた外力を A 部に変換する行列である．ただし $(\circ)^{rct}$ は反力を表し、 $F^{rct} = -F^{imp}$ である．式 (9) は上段と下段にそれぞれ A 部と冗長マニピュレータの運動方程式を示しており、 A 部と冗長マニピュレータ間の動力学の干渉を考慮することが可能となる．提案するハイブリッド制御法は、式 (9) の上段、 A 部の運動方程式より導出する．ただし、 \dot{v}_A と F_A は、非干渉化のため前章と同様に選択行列 S を用いて $\dot{v}_A = S \dot{v}_A^{ref}$ および $F_A^{imp} = (U - S) F_A^{ref}$ となる．以上より、求める関節角加速度指令値は以下として示すことができる．

$$\ddot{\theta}^{ref} = M_{Al}^+ \left((U - S) F_A^{ref} + J_{BA}^T F_B^{rct} - M_A S \dot{v}_A^{ref} - (C_A + G_A) \right) + (U - M_{Al}^+ M_{Al}) \ddot{\theta}_{any} \quad (10)$$

ただし、 $(\circ)^+$ は擬似逆行列を表し、 $\ddot{\theta}_{any} \in \mathbb{R}^n$ は任意の関節角加速度を示す．式 (10) の右辺第 1 項は、 A 部に発生する外力や非線形項の補償と、 A 部の位置と力のハイブリッド制御を満たす．右辺第 2 項は、反動零空間 $\mathcal{N}(M_{Al})$ を張る M_{Al} の零空間ベクトルを示し、物理的には、 A 部に対して動力学的に非干渉となるマニピュレータの動作を示す．このように、動力学の干渉による動作の分解を利用する手法が、反動零空間法の概念である．

次に、反動零空間に基づくハイブリッド制御のための関節トルク指令値を求める．ここでは、非線形項の線形化補償のため、計算トルク法を用いる．式 (9) 下

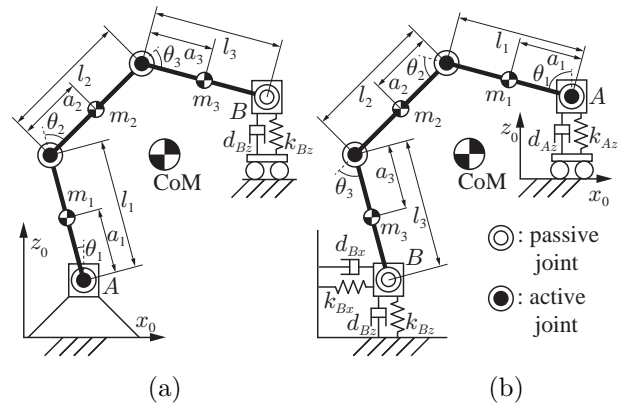


図 1 動力学シミュレーションのモデルおよび初期状態

段のマニピュレータ運動方程式より、計算トルク制御式は、以下となる．

$$\tau^{ref} = M_{Al}^T S \dot{v}_A^{ref} + M_l \ddot{\theta}^{ref} + c_l + g_l - J_{Bl}^T F_B^{rct} \quad (11)$$

式 (11) の右辺第 1 項は興味深い項であり、 A 部の位置制御 \dot{v}_A^{ref} によるマニピュレータ関節への動力学的な干渉トルクをフィードフォワード制御により補償することを可能とする．最終的に、式 (10) を式 (11) に代入することで、関節トルク指令値は以下のように求まる．

$$\begin{aligned} \tau^{ref} = & (M_{Al}^T - \hat{M} M_A) S \dot{v}_A^{ref} + \hat{M} (U - S) F_A^{ref} \\ & + M_l (U - M_{Al}^+ M_{Al}) \ddot{\theta}_{any} + (\hat{M} J_{BA}^T - J_{Bl}^T) F_B^{rct} \\ & - \hat{M} (C_A + G_A) + c_l + g_l \end{aligned} \quad (12)$$

ただし、 $M_l M_{Al}^+ = \hat{M}$ である．

4. 動力学シミュレーションによるハイブリッド制御の比較

前章までに、Khatib の提案するハイブリッド制御法 (以降、KTB-HC) と我々の提案する反動零空間法に基づくハイブリッド制御法 (以降、RNS-HC) について述べた．本章では、図 1 に示す平面上 3 リンク冗長マニピュレータモデルの動力学シミュレーションを通して、KTB-HC と RNS-HC の比較を行う．ただし、平面モデルのため、 $F_A \rightarrow f_A$ 、 $F_B \rightarrow f_B$ 、 $v_A \rightarrow v_A$ 、 $C_A \rightarrow c_A$ と表記する．

4.1 モデリングおよびフィードバック制御

本シミュレーションでは、図 1 に示す平面上 3 リンク ($n = 3$) 冗長マニピュレータ先端の x 軸方向および z 軸方向の計 2 自由度 ($m = 2$) を制御する．また、各リンクの長さ、重心位置、質量はそれぞれ、 $l_i = 1.0$ m、 $a_i = 0.5$ m、 $m_i = 10$ kg ($i = 1, 2, 3$) とする．図 1(a) は KTB-HC に対するモデルであり、 A 部を固定ベース、 B 部を冗長マニピュレータ先端として扱う．また、 B 部の z 軸方向には、ばねとダンパそして壁を模擬する．これにより、 x 軸方向の位置制御と z 軸方向の力制御を行う．一方、図 1(b) は RNS-HC に対するモデルであり、 B 部を固定ベースとして、 A 部を冗長マニピュレータ先端として扱う．また、 A 部の z 軸方向に

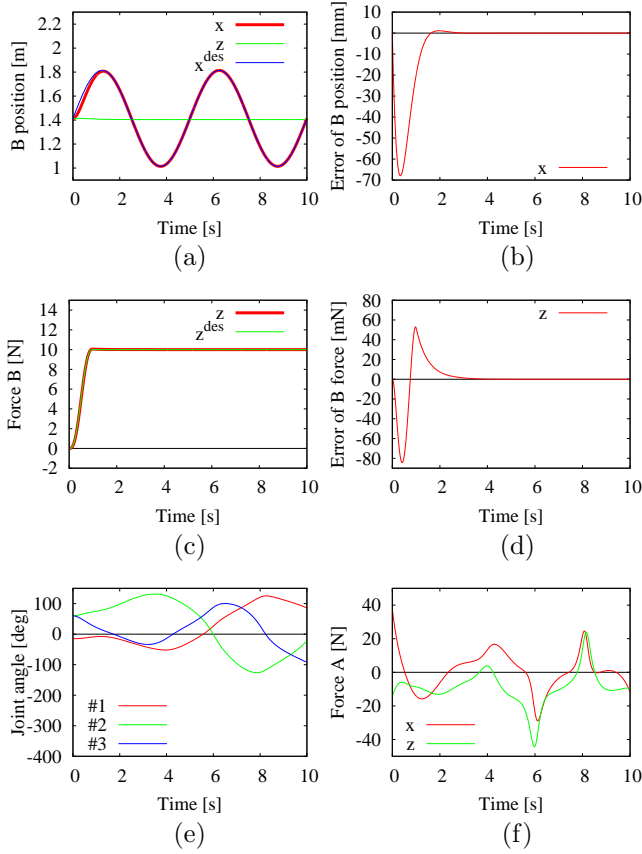


図 2 KTB-HC (条件 1: 零空間ベクトルを用いない)

は、ばねとダンパそして壁を模擬する．これにより、 x 軸方向の位置制御と z 軸方向の力制御を行う．また、 A 部と B 部にかかる拘束力 f_A , f_B は式 (13) のように求まり、拘束力は式 (9) の右辺にあるため負の値する．

$$f_i = -K_i(x_i - x_{i0}) - D_i v_i \quad (13)$$

ただし、 $K_i = \text{diag}[k_{ix} \ k_{iz}]$ および $D_i = \text{diag}[d_{ix} \ d_{iz}]$, x_i ($i = A, B$) は、それぞれ i 部のばねおよびダンパゲイン行列、位置ベクトルを示す．また、 $(\cdot)_0$ は初期値を表している．重力加速度は 0 とし、図 1(a) および (b) で用いたばねダンパゲイン値は、KTB-HC においては $k_{Bx} = 0 \text{ N/m}$, $k_{Bz} = 1.0 \times 10^3 \text{ N/m}$, $d_{Bx} = 0 \text{ Ns/m}$, $d_{Bz} = 5.0 \times 10^2 \text{ Ns/m}$. RNS-HC においては $k_{Ax} = 0 \text{ Ns/m}$, $k_{Az} = 1.0 \times 10^3 \text{ Ns/m}$, $d_{Ax} = 0 \text{ Ns/m}$, $d_{Az} = 5.0 \times 10^2 \text{ Ns/m}$, $k_{Bx} = k_{Bz} = 2.0 \times 10^4 \text{ Ns/m}$, $d_{Bx} = d_{Bz} = 1.0 \times 10^4 \text{ Ns/m}$. 式 (8) および (12) における x 軸方向の位置および z 軸方向の力制御の指令値は、以下のフィードバック制御式により得る．

$$\dot{v}_i^{ref} = \dot{v}_i^{des} + k_d(v_i^{des} - v_i) + k_p(x_i^{des} - x_i) \quad (14)$$

$$f_i^{ref} = f_i^{des} + k_f(f_i^{des} - f_i) \quad (15)$$

式中、 k_p と k_d と k_f は位置と速度と力のフィードバックゲインである．ただし、KTB-HC のとき $i = B$, RNS-HC のとき $i = A$ である．また、選択行列は $S = \text{diag}[1 \ 0]$ である．

4.2 シミュレーション

共通条件について、KTB-HC の初期関節角度は $\theta = [-15 \ 60 \ 60]^T \text{ deg}$ とし、RNS-HC の初期関節角度は

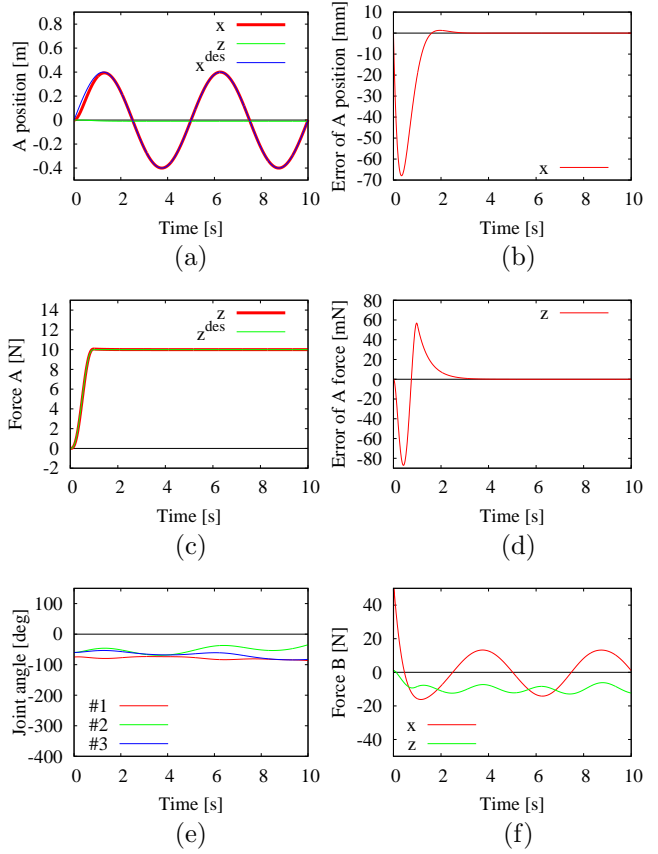


図 3 RNS-HC (条件 1: 零空間ベクトルを用いない)

$\theta = [-75 \ -60 \ -60]^T \text{ deg}$ とした．また、サンプリングタイムは 1 ms 、動作時間は 10 s とした．

シミュレーションは、下記 2 つの条件をそれぞれ KTB-HC および RNS-HC に対し行う．そのため、合計 4 つのシミュレーションを行う．

- 条件 1: ハイブリッド制御の性能を評価する．
 x 軸方向の先端目標位置に $0.4 \sin(2\pi t/5) \text{ m}$ を与えフィードバック制御する．ただし、 $k_p = 10 \text{ s}^{-2}$ および $k_d = 5.0 \text{ s}^{-1}$ と設定する．また、先端目標力として z 軸方向に五次補間法によるスプライン関数を用い、壁に対し 1.0 s 間かけて徐々に -10 N 与える力制御を行う．また、 $k_f = 0$ としフィードフォワード制御を行い、 $\tau_{any} = 0 \text{ Nm}$, $\ddot{\theta}_{any} = 0 \text{ rad/s}^2$ とした．
- 条件 2: 冗長自由度の影響を評価する．
条件 1 と同様である．ただし、冗長自由度の影響を評価するため適当な零空間ベクトルを与える．具体的には、KTB-HC は $\tau_{any} = [0 \ 2.0 \ 0]^T \text{ Nm}$, RNS-HC は $\ddot{\theta}_{any} = [0 \ 2.0 \ 0]^T \text{ rad/s}^2$ とした．

条件 1 での KTB-HC と RNS-HC の結果を図 2 と図 3 に、条件 2 での KTB-HC と RNS-HC の結果を図 4 と図 5 にそれぞれ示す．図中、(a) は先端部の位置と目標値、(b) は先端部 x 軸方向の位置の誤差、(c) は先端部 z 軸方向の拘束力と目標値、(d) は先端部 z 軸方向の力の誤差、(e) はマニピュレータ関節角度、(f) は拘束部の反力をそれぞれ示している．

まず、図 2 と図 3 を比較すると、両結果の (a)~(d) がほぼ一致していることがわかる．一方で、両結果の (e)

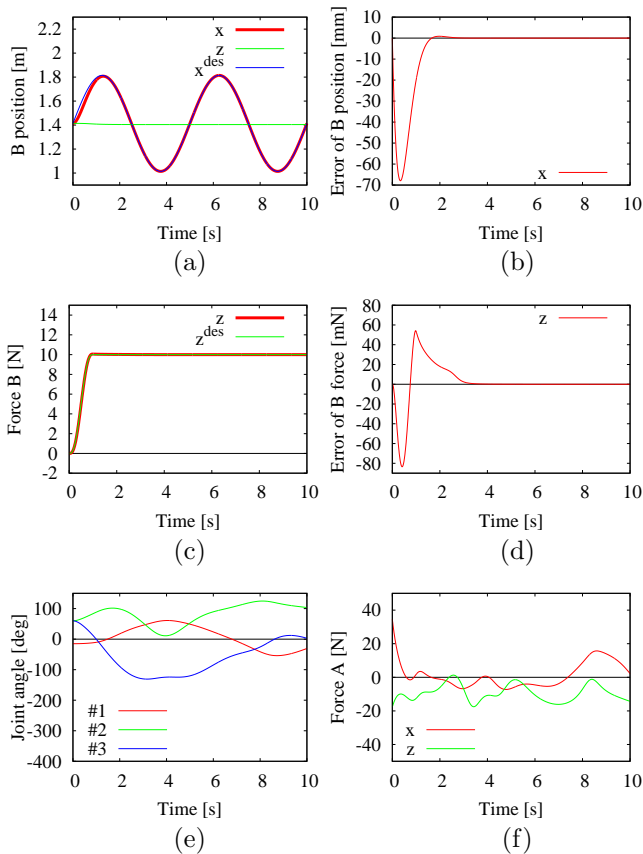


図4 KTB-HC (条件2: 零空間ベクトルを用いる)

および (f) は、異なる結果となっている。具体的には、図 2(e) の姿勢が大きく変化しているのに対し、図 3(e) は、比較的単純な動作である。また図 3(f) は、周期的な運動と捉えることができ、RNS-HC は、KTB-HC より変化が小さいことがわかり、最大関節速度も KTB-HC は -1.68 rad/s なのに対して RNS-HC は 0.38 rad/s と約 $1/4$ の値となった。これにより、図 2(f) の影響が、図 3(f) より激しくなっている。

次に、図 4 と図 5 の比較を行う。RNS-HC および KTB-HC とともに、冗長自由度による動作が付加されているが、両結果の (d) を除き、先端のハイブリッド制御に対し大きな影響を与えていない。(d) においては、フィードバック制御を行っていないため、変化が現れた。しかしながら、前結果と同様に、図 4 と図 5 の (a)~(d) がほぼ一致している。以上の結果より、冗長マニピュレータにおいて、提案するハイブリッド制御法 RNS-HC が、Khatib のハイブリッド制御法 KTB-HC と同等の性能を有すると結論づけられる。

一方で、冗長自由度による動作が、図 4 と図 5 の (e)(f) に影響していることも見受けられる。これは、冗長自由度による固定ベースへの制御が可能であることを示唆しており、効率的な制御手法の研究が今後の課題となり得る。

5. 結言と今後の課題

本稿では、Khatib が提案する、冗長マニピュレータ先端の位置と力のハイブリッド制御法と我々が新に提案する、反動零空間法に基づく位置と力のハイブリッド制御法を、動力学シミュレーションを通して比較し

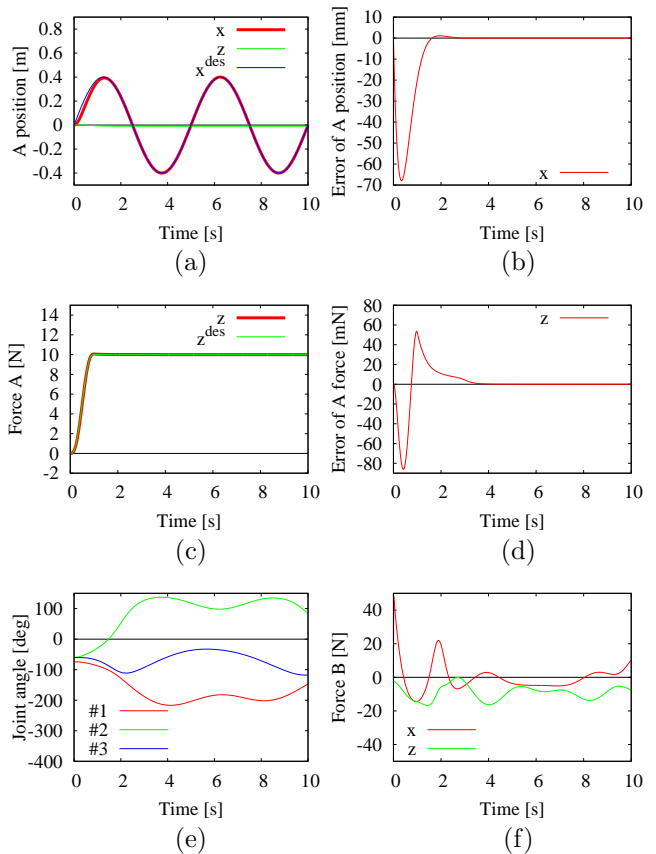


図5 RNS-HC (条件2: 零空間ベクトルを用いる)

た。この結果、同等の性能を持つハイブリッド制御であると結論づけた。また、提案するハイブリッド制御は、Khatib のハイブリッド制御と比較した場合、より角度の変化は少なく、エネルギーの観点からも効率のよい制御であると考えられ、固定ベースもばねとダンパで作られており、実際にベースが固定されていない人型ロボットへの適応なども考えられる。さらに、冗長自由度による動作が、冗長マニピュレータ先端に対し影響を与えないと同時に、他端の固定ベースに対し影響を与えることを示した。これより、冗長自由度による動作がさらに制御として使い、固定ベースを制御可能であると考えられる。よって、本提案ハイブリッド制御のエネルギー効率や冗長自由度の制御利用が、今後の課題になりえる。

参考文献

- [1] O. Khatib: "A unified approach for motion and force control of robot manipulators: the operational space formulation," Int. J. of Robotics and Automation, vol. RA-3, no. 1, pp. 43-53, 1987.
- [2] R. M. Murray, Z. Li and S. S. Sastry: A mathematical introduction to robotic manipulator. pp. 282-290, CRC press, 1994.
- [3] D. N. Nenchev, K. Yoshida and Y. Umetani: "Introduction of redundant arms for manipulation in space," in IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, Tokyo, Japan, pp. 679-684, 1988.
- [4] D. N. Nenchev, K. Yoshida and M. Uchiyama: "Reaction null-space based control of flexible structure mounted manipulator systems," in Proc. IEEE Int. Conf. on Decision and Control, Kobe, Japan, pp. 4118-4123, 1996.