

2112 複数腕を持つフリーフライングロボットの運動制御 その2：2腕協調による対象物の捕捉制御

東京工業大学 ○吉田 和哉、倉爪 亮、梅谷 陽二

Control of Free-Flying Robot with Multiple Manipulators
(Pt.II : Target Capture Operation by Dual Arm Coordination)
Kazuya Yoshida, Ryo Kurazume and Yoji Umetani
Tokyo Institute of Technology

1 まえがき

複数のマニピュレータを有する宇宙ロボットを用いて宇宙空間で構造物の組み立てなどの作業を行う際、その複数マニピュレータを協調して制御することは、作業の能率化や消費エネルギーの最小化など様々なメリットが考えられる。

そこで本稿では、マニピュレータを2本搭載した宇宙ロボットが、空間に浮遊している対象物体を両腕で捕捉する作業を考え、片腕を軌道制御する間にもう一方の腕を使って消費エネルギーを最小化するような協調制御を行う方法を提案する。シミュレーションにより、提案する方法と両方の腕をそれぞれの目標軌道に沿って独立に制御する場合とを比較し、協調制御の有用性を明らかにする。

2 衛星に取り付けられた複数マニピュレータの協調制御

2.1 モデリング

本稿で使用する衛星のモデルとして、6自由度のマニピュレータを2本搭載した宇宙ロボットを考える。それぞれのマニピュレータは右肩に番号1,2を付けて表す。また、ロボット本体上には姿勢制御のために3軸のリアクションホイールを搭載するものとし、それをひとつ腕とみなして右肩に3,4,5

と番号をつける。ロボット本体、マニピュレータ及びリアクションホイールの諸元をTable.1に示す。

関節変数を

$$\Phi = (\phi_1^1, \dots, \phi_6^1, \phi_1^2, \dots, \phi_6^2, \phi_1^3, \phi_1^4, \phi_1^5)^T$$
$$\Phi \in R^{15 \times 1}$$

とすると、各マニピュレータ手先の運動 \dot{x}^k と関節変数 Φ の間には一般化ヤコビ行列 $J^{*k} = (J_T^{*k}, J_R^{*k})^T$ を用いて次の関係がある[1]。

$$\dot{x}^1 = \begin{bmatrix} v_r^1 \\ \omega_r^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_T^{*1} \\ J_R^{*1} \end{bmatrix} \Phi$$
$$= J^{*1} \Phi \quad (1)$$

$$\dot{x}^2 = \begin{bmatrix} v_r^2 \\ \omega_r^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_T^{*2} \\ J_R^{*2} \end{bmatrix} \Phi$$
$$= J^{*2} \Phi \quad (2)$$

$$J^{*1}, J^{*2} \in R^{6 \times 15}$$

$$J_T^{*1}, J_R^{*1}, J_T^{*2}, J_R^{*2} \in R^{3 \times 15}$$

また、台座衛星の運動 v_0, ω_0 と関節変数 Φ の間には次の関係がある。

$$v_0 = -J_v \Phi \quad (3)$$

$$\omega_0 = -J_\omega \Phi \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_v, \mathbf{J}_\omega \in R^{3 \times 15}$$

また、各関節の駆動トルクを

$$\tau = (\tau_1^1, \dots, \tau_6^1, \tau_1^2, \dots, \tau_6^2, \tau_1^3, \tau_1^4, \tau_1^5)^T$$

$$\tau \in R^{15 \times 1}$$

とすると、この系の運動方程式は

$$\ddot{\tau} = \mathbf{H}^* \dot{\phi} + \mathbf{C}^*(\phi, \dot{\phi}) \quad (5)$$

で与えられる。ただし、 $\mathbf{H}^* \in R^{15 \times 15}$ は一般化慣性行列である。

なお本稿では、マニピュレータ・ハンドを捕獲対象物の「つかみ点」の位置にもつくるまでの問題を取り扱い、把持する瞬間のハンドと対象物との接触問題、および両手で一物体を把持することによって生じる閉リンク構造の問題等は考へない。

2.2 両腕の同時／独立制御

ロボット本体の姿勢を保持しつつ、作業領域内に静止する浮遊物体を捕捉するための軌道制御を、両方のマニピュレータについて同時／独立に行う場合を考える。

捕捉作業のために両マニピュレータ・ハンドに与える加速度を $\ddot{\mathbf{x}}_d^k = (\ddot{\mathbf{v}}_{rd}^{kT}, \ddot{\boldsymbol{\omega}}_{nd}^{kT})^T$ とする。 (1) ~ (3) 式より、各関節で発生すべき加速度は次式で与えられる。

$$\ddot{\phi} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}^{*1} \\ \mathbf{J}^{*2} \\ -\mathbf{J}_\omega \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_d^1 - \mathbf{j}^{*1} \dot{\phi} \\ \ddot{\mathbf{x}}_d^2 - \mathbf{j}^{*2} \dot{\phi} \\ \mathbf{j}_\omega \dot{\phi} \end{bmatrix}$$

$$= \mathbf{J}^{*-1} (\ddot{\mathbf{x}}_d - \mathbf{j}^* \dot{\phi}) \quad (6)$$

$$\mathbf{J}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{J}^{*1} \\ \mathbf{J}^{*2} \\ -\mathbf{J}_\omega \end{bmatrix}, \quad \ddot{\mathbf{x}}_d = \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_d^1 \\ \ddot{\mathbf{x}}_d^2 \\ \boldsymbol{\omega}_{rd} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}^* \in R^{15 \times 15}, \quad \ddot{\mathbf{x}}_d \in R^{15 \times 1}$$

この場合 \mathbf{J}^* は 15×15 の正方行列となり、特異姿勢になれば逆行列が存在する。(6)式により求められた $\ddot{\phi}$ を用いて分解加速度制御を行った結果を Fig.1 に、逆運動力学演算により求められる制御トルクの自乗和を Fig.2 に実線で示す。

Table 1 Specification of space robot with dual arms and wheels

Robot Base & Arms	mass [Kg]	length [m]		
		l_i	a_i	b_i
link 0	2000.0	3.5	1.75	1.75
link 1,7	30.0	0.25	0.125	0.125
link 2,8	70.0	2.5	1.25	1.25
link 3,9	70.0	2.5	1.25	1.25
link 4,10	10.0	0.5	0.25	0.25
link 5,11	10.0	0.25	0.125	0.125
link 6,12	10.0	0.25	0.125	0.125

moment of inertia [Kgm ²]		
$I_{i[1,1]}$	$I_{i[2,2]}$	$I_{i[3,3]}$
1688.0	1688.0	2024.0
0.1750	0.1750	0.0375
0.0875	36.50	36.50
0.0875	36.50	36.50
0.0125	0.215	0.215
0.0125	0.0583	0.0583
0.0583	0.0583	0.0125

Reaction Wheel	mass [Kg]	moment of inertia [Kgm ²]		
		$I_{i[1,1]}$	$I_{i[2,2]}$	$I_{i[3,3]}$
link 13	100.0	12.5	6.25	6.25
link 14	100.0	6.25	12.5	6.25
link 15	100.0	6.25	6.25	12.5

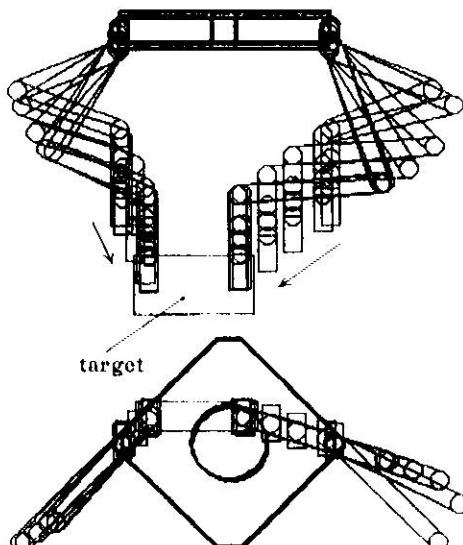


Fig.1 Target capture operation (simultaneous 2 arm path tracking)

2.3 両腕協調によるトルク最小化制御

次に、片方の腕だけ軌道制御を行い、残りの腕を使って系全体で必要なトルクを最小にするような協調制御を行う問題を考える。ここで、片腕の軌道制御の目標値に対して系全体の自由度数は11個であるから、冗長マニピュレータの制御の考え方を導入する[2]。本稿では、第一サブタスクとして与えられたいいくつかの軌道制御を行い、第二サブタスクとしてトルク自乗項の瞬時最適化を考える[3]。

まず、軌道制御を行う作業変数として、ハンド1の位置、姿勢 $\ddot{\mathbf{x}}_d^1 = (\dot{\mathbf{v}}_{rd}^{1T}, \dot{\boldsymbol{\omega}}_{rd}^{1T})^T$ 、ハンド2の姿勢 $\ddot{\mathbf{x}}_d^2 = \dot{\boldsymbol{\omega}}_{rd}^2$ およびロボット本体の姿勢 $\dot{\boldsymbol{\omega}}_{bd}$ の12個を考える。これに対して総自由度数は15個であるから、逆変換の一般解は次のようになる。

$$\ddot{\boldsymbol{\phi}} = \mathbf{J}^{*\#}(\ddot{\mathbf{x}}_d - \mathbf{J}^* \ddot{\boldsymbol{\phi}}) + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^{*\#} \mathbf{J}^*) \ddot{\boldsymbol{\zeta}} \quad (7)$$

$$\mathbf{J}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_T^{*1} \\ \mathbf{J}_R^{*1} \\ \mathbf{J}_H^{*2} \\ -\mathbf{J}_{bd} \end{bmatrix}, \quad \ddot{\mathbf{x}}_d = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_{rd}^1 \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_{rd}^1 \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_{rd}^2 \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_{bd} \end{bmatrix}$$

ただし、 $\mathbf{J}^{*\#}$ は \mathbf{J}^* の疑似逆行列であり、 $\ddot{\boldsymbol{\zeta}} \in R^{15 \times 1}$ は任意のベクトルである。さて、ここで目標値として、

$$\|\tau\| \quad (8)$$

を、最少にすることを考える。(8)式に(5)式で与えられる運動方程式、および(7)式を代入すると次式を得る。

$$\|\tau\| = \|\mathbf{H}^* \mathbf{J}^{*\#}(\ddot{\mathbf{x}}_d - \mathbf{J}^* \ddot{\boldsymbol{\phi}}) + \mathbf{H}^*(\mathbf{I} - \mathbf{J}^{*\#} \mathbf{J}^*) \ddot{\boldsymbol{\zeta}} + \mathbf{C}^*(\boldsymbol{\phi}, \dot{\boldsymbol{\phi}})\| \quad (9)$$

ここで、 $\text{rank}(\mathbf{H}^*(\mathbf{I} - \mathbf{J}^{*\#} \mathbf{J}^*)) = 3 > 0$ であるので上式を最小にするような $\ddot{\boldsymbol{\zeta}}$ は、次式で与えられる。

$$\ddot{\boldsymbol{\zeta}} = -[\mathbf{H}^*(\mathbf{I} - \mathbf{J}^{*\#} \mathbf{J}^*)]^* \\ (\mathbf{H}^* \mathbf{J}^{*\#}(\ddot{\mathbf{x}}_d - \mathbf{J}^* \ddot{\boldsymbol{\phi}}) + \mathbf{C}^*(\boldsymbol{\phi}, \dot{\boldsymbol{\phi}})) \quad (10)$$

このようにして求められた $\ddot{\boldsymbol{\zeta}}$ を(7)式に代入すると、12個の軌道制御目標値を満足しかつ残った自由度を使って系全体のトルク最小化を図るような、各関節の制御角加速度が次式のように求められる。

$$\ddot{\boldsymbol{\phi}}_d = \mathbf{J}^{*\#}(\ddot{\mathbf{x}}_d - \mathbf{J}^* \ddot{\boldsymbol{\phi}}) - [\mathbf{H}^*(\mathbf{I} - \mathbf{J}^{*\#} \mathbf{J}^*)]^* \\ (\mathbf{H}^* \mathbf{J}^{*\#}(\ddot{\mathbf{x}}_d - \mathbf{J}^* \ddot{\boldsymbol{\phi}}) + \mathbf{C}^*(\boldsymbol{\phi}, \dot{\boldsymbol{\phi}})) \quad (11)$$

さらにこの関節角加速度を、(5)式で与えられる運動方程式に代入すると、

$$\begin{aligned} \ddot{\boldsymbol{\tau}} &= \mathbf{H}^* \ddot{\boldsymbol{\phi}}_d + \mathbf{C}^*(\boldsymbol{\phi}, \dot{\boldsymbol{\phi}}) \\ &= (\mathbf{I} - \mathbf{H}^*[\mathbf{H}^*(\mathbf{I} - \mathbf{J}^{*\#} \mathbf{J}^*)]^*) \\ &\quad (\mathbf{H}^* \mathbf{J}^{*\#}(\ddot{\mathbf{x}}_d - \mathbf{J}^* \ddot{\boldsymbol{\phi}}) + \mathbf{C}^*(\boldsymbol{\phi}, \dot{\boldsymbol{\phi}})) \\ &= (\mathbf{I} - \mathbf{H}^*[\mathbf{H}^*(\mathbf{I} - \mathbf{J}^{*\#} \mathbf{J}^*)]^*) \ddot{\boldsymbol{\tau}}_0 \quad (12) \end{aligned}$$

となる。ここで $\ddot{\boldsymbol{\tau}}_0$ は、(7)式において $\ddot{\boldsymbol{\zeta}} = 0$ としたときのトルクの値であり、(12)式によってトルク配分の最適化が行われる。

2.4 両腕協調による対象物捕捉制御

上に求めたトルク最適化制御では、ターゲットの捕獲を行うのは片腕のみであり、他方の腕がどのような位置に動かかについては何も規定されない。しかしながら、衛星の姿勢を保持しつつ使用トルクを最小化するためには、両腕をロボットの中心面に対して対称に動かしてないのアクションをキャンセルするのが最も効率的となることが、直感的に予想できる。たとえば、右手を前に持ってくれれば、必然的に左手も前方に追従する。

そこで、両腕による対象物捕捉を次の2つのフェーズに分けて考える。

phase 1 前方にある対象物に対し、腕1に捕捉軌道を与えるトルク最小化制御を行う。このとき腕2は自然と前方に動き、対象物近傍まで来ることになる。

phase 2 腕1が対象物を捕捉後、腕2をあとから添えるように対象物へ向かって軌道制御する。

この方法に基づいて、対象物捕捉を行った結果を Fig.3 に、制御トルクの合算和を Fig.2 に点線で示す。ここで、動作開始～4.3秒が phase 1 であり、それ以降が phase 2 である。

Fig.3 より、phase 1においては予想された通りに、両腕を対称に動かすような動作が実現されていることがよくわかる。またトルクの大きさを先の両腕軌道制御 (Fig.2 実線) と比較すると、トルク最適化の効果が顕著にあらわされていることがわかる。とくに、両腕の軌道が特異点近傍に与えられている場合 (実線の動作開始部分) では、かなり大きな制御トルクが必要となるのに対し、提案する両腕協調制御ではトルクを最小化するという条件より、自動的に特異点を回避するような動作が選択されている。

提案する方法では、最終的には phase 2 として腕 2 の軌道制御も必要となるが、phase 1 + 2 の全動作で必要となるエネルギーは、最初から両腕同時に軌道制御するよりも小さくすることが可能である。ここに示した例ではエネルギー消費を約 3/4 に減らすことができ、よって本方法は、瞬時トルクの最小化にも、全消費エネルギーの節約にも有効なものであることが明らかとなった。

3 あとがき

本稿では、2本腕を搭載する宇宙ロボットにおいて、片方の腕を目標に向かって制御する間に、余っている（冗長となっている）他方の腕をトルク最小化の criterion の基に協調制御する方法を提案した。この方法によるトルク最小動作は、(1)両手を左右対称に動かし、(2)特異姿勢なるべく回避するという性質を持つ。この性質をうまく利用することにより、瞬時トルクを最小化しつつ全消費エネルギーも節約できるような、作業対象物の捕捉制御法を明らかにした。

4 参考文献

- [1] 吉田、倉爪、梅谷：“複数腕を持つフリーフライングロボットの運動制御 その I: モデリングとヤコビ行列の定式化…”，第 8 回日本ロボット学会学術講演会予稿集、1990.

- [2] 吉田、ネンチエフ、梅谷：“宇宙用冗長マニピュレタのモデリングと制御”，計測自動制御学会論文集、vol.26, No.12, 1990. (掲載予定)
- [3] Hollerbach, Suh: "Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimizaiton", IEEE J. of Robotics and Automation, vol.3, No.4, 1987.

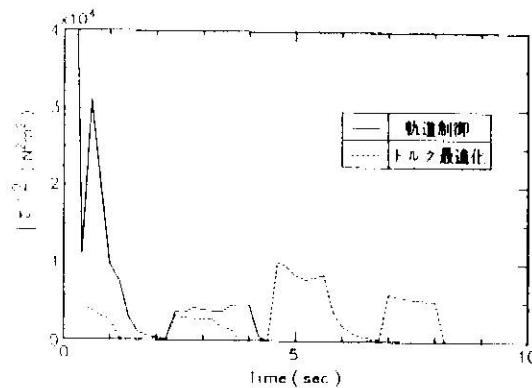


Fig.2 Required torque for two ways of target capture operation

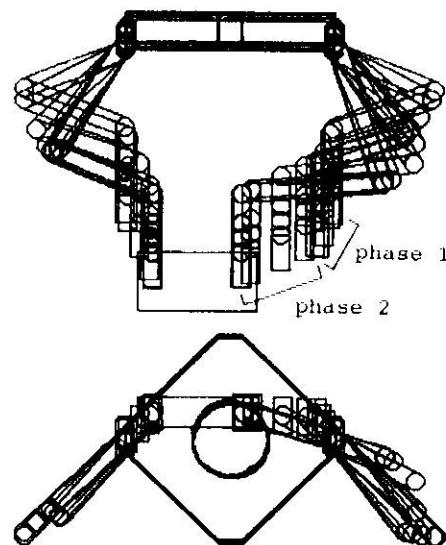


Fig.3 Target capture operation (dual arm coordination)