

複数台の宇宙ロボットによる浮遊物体の制御*

小林 順*¹, 大川 不二夫*², 加藤 了三*³

Handling of a Floating Object by Several Space Robots

Jun KOBAYASHI, Fujio OHKAWA and Ryozo KATOH

This paper deals with handling of a floating object by several space robots. Operational ability of a space robot depends on its scale, and the scale of a space robot is restricted by the capacity of a rocket, which is used to launch the space robot into space. For this reason, a cooperation of several smaller scale space robots is useful and necessary in space development. In this paper, system which consists of two space robots and a floating object is considered, and two partition methods of its kinematic relation equation is proposed. Moreover, Resolved Motion Rate Control schemes for the system are designed based on the partitioned kinematic relation equations, and computer simulations are carried out to verify the control law.

Key Words: Space Robot, Positioning, Digital Control, Cooperation, Partitioned Kinematic Relation, Resolved Motion Rate Control

1. はじめに

宇宙環境での宇宙飛行士による作業は、危険であるとともに、極度の緊張を必要とする難しい作業である。一方、本格的に宇宙開発を実施するためには、非常に多くの作業が必要であり、宇宙飛行士の作業のみに頼ることは困難である。そこで、宇宙飛行士に代わって作業を行う宇宙ロボットに大きな期待が寄せられている⁽¹⁾。

宇宙ロボットの作業能力、例えば作業領域や可操作性などは、宇宙ロボットの慣性パラメータ（質量や慣性モーメントなど）に依存するため、重い物体を操作するには、重いロボットが必要である。一方、宇宙ロボットの慣性パラメータや幾何学的な大きさは、ロケットの打ち上げ能力によって制限される。したがって、巨大な宇宙ロボットを地上から輸送することは現実的でない。しかし、未来の宇宙開発においては、大きな（重い）物体を操作する作業が予想されている。このような状況を考慮すると、複数台の宇宙ロボット

による協同作業が必要になると考えられる。

宇宙ロボットの制御手法に関しては、すでにさまざまな研究^{(2)~(7)}がなされているが、それらの研究のほとんどは、1台の宇宙ロボットによる作業を対象としている。複数台の宇宙ロボットによる作業に関する研究としては、推進用アクチュエータを備えた複数の移動体ロボットにより、巨大な宇宙構造物を操作する方法について、理論的考察および実験による理論の検証を行った木村らの研究がある⁽⁸⁾⁽⁹⁾。しかし、これらはマニピュレータを有する宇宙ロボットを想定した研究ではなく、操り問題の一つとして宇宙ロボットを扱った研究であると分類できる。

本論文では、マニピュレータを装備している2台の宇宙ロボットにより、浮遊物体を操作する問題について以下のことを行った。

1. 最初に、システムの運動学関係式の導出を行う。
2. 1で導いた運動学関係式の、2種類の分割法を提案する。
3. 2の提案により得られる運動学関係式の冗長自由度を比較する。
4. 2の分割法に基づき、複数台の宇宙ロボットからなるシステムに対する分解速度制御法を提案する。

* 原稿受付 1997年12月18日。

¹ 九州工業大学大学院 (☎ 820 8502 飯塚市大字川津680-4)。² 正員, 九州工業大学情報工学部。³ 正員, 九州工業大学工学部 (☎ 804 8550 北九州市(柳)区仙水町1-1)。

5. 提案した制御法を計算量の観点から比較する。
6. 最後に、計算機シミュレーションにより、提案した制御法の有用性を検証する。

2. 宇宙ロボットのモデル

本論文で対象とした宇宙ロボットシステムの三次元の基本モデルを図1に示す。宇宙ロボットが2台の場合を図2に示す。図1と2に示されるシステムをそれぞれ、R-OシステムとR-O-Rシステムと呼ぶ。‘R’はロボット、‘O’は浮遊物体、‘-’はマニピュレータを表す。

設定した仮定および変数の定義を以下に示す。

[仮定]

1. 宇宙ロボットシステムを構成するリンクなどの要素はすべて剛体である。
2. 宇宙ロボットシステムに外力は作用しない。すなわち、運動量、角運動量保存則が成り立つ。
3. 宇宙ロボットシステムの初期運動量、角運動量は

零である。

[変数]

p_{int} : 注目点 (Point of Interest) の位置ベクトル

p_i^k : 関節 i^k の位置ベクトル

r_i^k : リンク i^k の質量中心位置ベクトル

r_0 : 浮遊物体の質量中心位置ベクトル

v_0 : 浮遊物体の並進速度ベクトル

ω_0 : 浮遊物体の回転速度ベクトル

r_g : 宇宙ロボットシステムの質量中心位置ベクトル

m_i^k : リンク i^k の質量

I_i^k : リンク i^k の質量中心まわりの慣性テンソル

w^k : ロボット k の総質量

w : 宇宙ロボットシステムの総質量

ϕ_0 : 浮遊物体の姿勢角

ϕ_i^k : 関節 i^k の相対関節角度

E : 単位行列

\bar{a} : ベクトル $a = (a_x, a_y, a_z)^T$ に対して、

$$\bar{a} \triangleq \begin{pmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{pmatrix}$$

と定義した歪対称行列

$$r_{0i}^k \triangleq r_i^k - r_0, \quad r_{0g} \triangleq r_g - r_0$$

3. 運動学関係式 (一般化ヤコビ行列) の導出

吉田らによって、1台の宇宙ロボットに対する一般化ヤコビ行列が提案されている⁽³⁾⁽¹⁰⁾。彼らの方法では、宇宙ロボットの一般化座標として、宇宙ロボット本体の位置、姿勢およびマニピュレータの関節角が選択されているが、複数台の宇宙ロボットからなる宇宙ロボットシステムに適用する場合、一般化座標が冗長となるために、一般化座標の再定義が必要となる。

本論文では、把持物体の位置、姿勢およびマニピュレータの関節角を、宇宙ロボットシステムの一般化座標として選択する。この結果、複数台の宇宙ロボットからなる宇宙ロボットシステムの一般化ヤコビ行列が、一般化座標を再定義することなく、簡潔に求めることができることが示される。なお、ロボットが把持物体を持たない場合は、エンドエフェクタの位置、姿勢、およびマニピュレータの関節角が、一般化座標として選択される。

3.1 R-Oシステムの運動学関係式の導出

本節では、R-Oシステムの運動学関係式、つまり一般化ヤコビ行列を導出する。

まず、浮遊物体上の注目点の作業変数ベクトルを以下のように定義する。

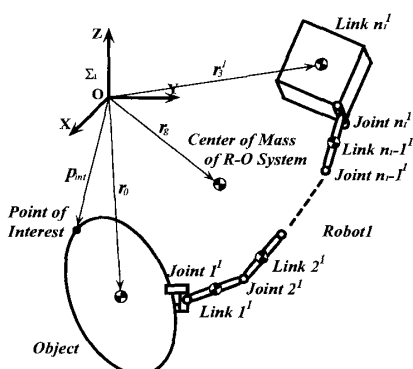


Fig. 1 R-O system

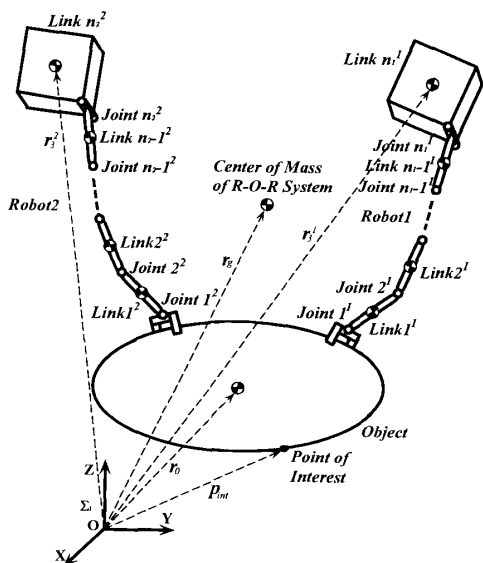


Fig. 2 R-O-R system

$$\nu \triangleq \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{p}}_{int} \\ \boldsymbol{\omega}_0 \end{pmatrix} \in \mathcal{R}^6, \quad \dot{\mathbf{p}}_{int} \in \mathcal{R}^3, \quad \boldsymbol{\omega}_0 \in \mathcal{R}^3 \cdots \cdots (1)$$

このとき、次式が成り立つ。

$$\nu = \mathbf{J}_0 \begin{pmatrix} \mathbf{v}_0 \\ \boldsymbol{\omega}_0 \end{pmatrix} \cdots \cdots (2)$$

ここで、

$$\mathbf{J}_0 \triangleq \begin{pmatrix} \mathbf{E} & -(\widetilde{\mathbf{p}_{int} - \mathbf{r}_0}) \\ 0 & \mathbf{E} \end{pmatrix} \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$$

は、作業変数ベクトル ν の $(\mathbf{v}_0^T, \boldsymbol{\omega}_0^T)^T$ に関するヤコビ行列である。

次に、R-O システムの並進運動量および角運動量の総和をそれぞれ、 \mathbf{P} と \mathbf{L} とすると、

$$\begin{pmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{L} \end{pmatrix} = \mathbf{H}_0 \begin{pmatrix} \mathbf{v}_0 \\ \boldsymbol{\omega}_0 \end{pmatrix} + \mathbf{H}_\phi \dot{\phi}^1 = \mathbf{0} \cdots \cdots (3)$$

となる。ただし、

$$\mathbf{H}_0 \triangleq \begin{pmatrix} w\mathbf{E} & -w\tilde{\mathbf{r}}_{0g} \\ w\tilde{\mathbf{r}}_g & \mathbf{I}_w \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}_\phi \triangleq \begin{pmatrix} \mathbf{J}_{Tw}^1 \\ \mathbf{I}_\phi^1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{I}_w \triangleq \mathbf{I}_w^1 + \mathbf{I}_0, \quad \mathbf{I}_\phi \triangleq \sum_{i=1}^{n_1} (\mathbf{I}_i^1 - m_i^1 \tilde{\mathbf{r}}_i^1 \tilde{\mathbf{r}}_{0i}^1)$$

$$\mathbf{J}_{Tw}^1 \triangleq \sum_{i=1}^{n_1} m_i^1 \mathbf{J}_{Ti}^1, \quad \mathbf{I}_\phi^1 \triangleq \sum_{i=1}^{n_1} (\mathbf{I}_i^1 \mathbf{J}_{Ri}^1 + m_i^1 \tilde{\mathbf{r}}_i^1 \mathbf{J}_{Ti}^1)$$

$$\mathbf{J}_{Ti}^1 \triangleq (\mathbf{k}_i^1 \times (\mathbf{r}_i^1 - \mathbf{p}_i^1), \mathbf{k}_2^1 \times (\mathbf{r}_i^1 - \mathbf{p}_2^1), \dots,$$

$$\mathbf{k}_i^1 \times (\mathbf{r}_i^1 - \mathbf{p}_i^1), \mathbf{0}, \dots, \mathbf{0}) \in \mathcal{R}^{3 \times n_1}$$

$$\mathbf{J}_{Ri}^1 \triangleq (\mathbf{k}_1^1, \mathbf{k}_2^1, \dots, \mathbf{k}_i^1, \mathbf{0}, \dots, \mathbf{0}) \in \mathcal{R}^{3 \times n_1}$$

$$\dot{\phi}^1 \triangleq (\dot{\phi}_1^1, \dot{\phi}_2^1, \dots, \dot{\phi}_{n_1}^1)^T \in \mathcal{R}^{n_1}$$

である。ここで、式(3)を $(\mathbf{v}_0^T, \boldsymbol{\omega}_0^T)^T$ について解くと次式が得られる。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v}_0 \\ \boldsymbol{\omega}_0 \end{pmatrix} = -\mathbf{H}_0^{-1} \mathbf{H}_\phi \dot{\phi}^1 \cdots \cdots (4)$$

この式(4)を式(2)に代入すると、

$$\nu = \mathbf{J}_{int}^* \dot{\phi}^1 \cdots \cdots (5)$$

となる。ここで、

$$\mathbf{J}_{int}^* \triangleq -\mathbf{J}_0 \mathbf{H}_0^{-1} \mathbf{H}_\phi \in \mathcal{R}^{6 \times n_1}$$

は作業変数ベクトル ν の関節変数ベクトル $\dot{\phi}^1$ に関する一般化ヤコビ行列である。

3・2 R-O-R システムの運動学関係式の導出

本節では、R-O-R システムの運動学関係式を導出する。

作業変数ベクトル ν の $(\mathbf{v}_0^T, \boldsymbol{\omega}_0^T)^T$ に関するヤコビ行列は、R-O システムの場合と同じである [式(2)]。

R-O-R システムの並進運動量、角運動量保存則も、R-O システムの場合と同様に、次式で表される。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{L} \end{pmatrix} = \mathbf{H}_0 \begin{pmatrix} \mathbf{v}_0 \\ \boldsymbol{\omega}_0 \end{pmatrix} + \mathbf{H}_\phi \dot{\phi} = \mathbf{0} \cdots \cdots (6)$$

$$\mathbf{H}_0 \triangleq \begin{pmatrix} w\mathbf{E} & -w\tilde{\mathbf{r}}_{0g} \\ w\tilde{\mathbf{r}}_g & \mathbf{I}_w \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{H}_\phi \triangleq (\mathbf{H}_\phi^1 \quad \mathbf{H}_\phi^2), \quad \mathbf{H}_\phi^k \triangleq \begin{pmatrix} \mathbf{J}_{Tw}^k \\ \mathbf{I}_\phi^k \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{I}_w \triangleq \mathbf{I}_w^1 + \mathbf{I}_w^2 + \mathbf{I}_0, \quad \mathbf{I}_\phi^k \triangleq \sum_{i=1}^{n_k} (\mathbf{I}_i^k - m_i^k \tilde{\mathbf{r}}_i^k \tilde{\mathbf{r}}_{0i}^k)$$

$$\mathbf{J}_{Tw}^k \triangleq \sum_{i=1}^{n_k} m_i^k \mathbf{J}_{Ti}^k, \quad \mathbf{I}_\phi^k \triangleq \sum_{i=1}^{n_k} (\mathbf{I}_i^k \mathbf{J}_{Ri}^k + m_i^k \tilde{\mathbf{r}}_i^k \mathbf{J}_{Ti}^k)$$

$$\mathbf{J}_{Ti}^k \triangleq (\mathbf{k}_i^k \times (\mathbf{r}_i^k - \mathbf{p}_i^k), \mathbf{k}_2^k \times (\mathbf{r}_i^k - \mathbf{p}_2^k), \dots,$$

$$\mathbf{k}_i^k \times (\mathbf{r}_i^k - \mathbf{p}_i^k), \mathbf{0}, \dots, \mathbf{0}) \in \mathcal{R}^{3 \times n_k}$$

$$\mathbf{J}_{Ri}^k \triangleq (\mathbf{k}_1^k, \mathbf{k}_2^k, \dots, \mathbf{k}_i^k, \mathbf{0}, \dots, \mathbf{0}) \in \mathcal{R}^{3 \times n_k}$$

$$\dot{\phi} \triangleq \begin{pmatrix} \dot{\phi}^1 \\ \dot{\phi}^2 \end{pmatrix} \in \mathcal{R}^n$$

$$\dot{\phi}^k \triangleq (\dot{\phi}_1^k, \dot{\phi}_2^k, \dots, \dot{\phi}_{n_k}^k) \in \mathcal{R}^{n_k}$$

したがって、R-O-R システムの運動学関係式は、次のように、R-O システムの場合と同じ形式で表すことができる。

$$\nu = \mathbf{J}_{int}^* \dot{\phi} \cdots \cdots (7)$$

ただし、 $\mathbf{I}_w, \mathbf{J}_{Tw}, \mathbf{I}_\phi, \mathbf{J}_{Ti}^k$ と \mathbf{J}_{Ri}^k が、R-O システムの場合とは異なるため、二つの一般化ヤコビ行列の要素は異なる。

4. 運動学関係式の分割

R-O-R システムに対して、式(7)に基づいて、分解速度制御則を導くことができる。しかし、ここでは、前章で導出した運動学関係式(7)を分割することを考える。さらに、分割した運動学関係式の冗長自由度を比較する。

4・1 並進と回転に分割

まず、運動学関係式を並進運動を表す部分と、回転運動を表す部分に分割することを考える。この分割法は、一方のロボットに並進運動作業を、もう一方のロボットに回転運動作業を分担させる分割法であるといえる。

式(7)をブロックマトリックスで表すと次式となる。

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{p}}_{int} \\ \boldsymbol{\omega}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{J}_{intR}^{*1} & \mathbf{J}_{intR}^{*2} \\ \mathbf{J}_{intL}^{*1} & \mathbf{J}_{intL}^{*2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi}^1 \\ \dot{\phi}^2 \end{pmatrix} \cdots \cdots (8)$$

式(8)を並進運動を表す部分と回転運動を表す部分に分割すると、次式が得られる。

$$\dot{\mathbf{p}}_{int} = \mathbf{J}_{intR}^{*1} \dot{\phi}^1 \cdots \cdots (9)$$

$$\boldsymbol{\omega}_0 = \mathbf{J}_{intL}^{*2} \dot{\phi}^2 \cdots \cdots (10)$$

ここで、

$$\dot{\mathbf{p}}_{int} = \dot{\mathbf{p}}_{int} - \mathbf{J}_{intR}^{*2} \dot{\phi}^2, \quad \boldsymbol{\omega}_0 = \boldsymbol{\omega}_0 - \mathbf{J}_{intL}^{*1} \dot{\phi}^1$$

である。

以下では、式(9)と(10)をそれぞれ、ロボット1とロボット2の運動学関係式とみなす。

4・2 ロボット1とロボット2に分割

次に、R-O-R システムの運動学関係式(7)を、ロボット1に関

する部分とロボット2に関する部分に分割することを考える。

まず、R-O-Rシステムの並進運動量、角運動量保存則式(6)を、次式のように分割する。

$$AH_0^0 \begin{pmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{pmatrix} + H_0^1 \begin{pmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{pmatrix} + H_\phi^1 \phi^1 = 0 \dots\dots\dots (11)$$

$$(E-A)H_0^0 \begin{pmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{pmatrix} + H_0^2 \begin{pmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{pmatrix} + H_\phi^2 \phi^2 = 0 \dots\dots (12)$$

ここで、

$$H_0 \triangleq H_0^0 + H_0^1 + H_0^2$$

$$H_0^k \triangleq \begin{pmatrix} w^k E & -w^k \bar{r}_{0g}^k \\ w^k \bar{r}_g^k & I_w^k \end{pmatrix}$$

$$H_0^0 \triangleq \begin{pmatrix} m_0 E & 0 \\ m_0 \bar{r}_0 & I_0 \end{pmatrix}$$

である。また、分割係数 A は任意の実数行列である。ただし、分割された並進および角運動量保存則式(11)と(12)は、恒等的に成り立つものではないことを付け加えておく。

式(11)と(12)を $(v_0^T, \omega_0^T)^T$ について解くと、次式が得られる。

$$\begin{pmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{pmatrix} = -(H_0^1 + AH_0^0)^{-1} H_\phi^1 \phi^1 \dots\dots\dots (13)$$

$$\begin{pmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{pmatrix} = -(H_0^2 + (E-A)H_0^0)^{-1} H_\phi^2 \phi^2 \dots\dots\dots (14)$$

さらに、式(13)と(14)を式(2)に代入すると、次式が得られる。

$$\nu = J_{int}^{*1}(A) \phi^1 \dots\dots\dots (15)$$

$$\nu = J_{int}^{*2}(A) \phi^2 \dots\dots\dots (16)$$

ここで、

$$J_{int}^{*1}(A) \triangleq -J_0(H_0^1 + AH_0^0)^{-1} H_\phi^1 \in \mathcal{R}^{6 \times n_1}$$

$$J_{int}^{*2}(A) \triangleq -J_0(H_0^2 + (E-A)H_0^0)^{-1} H_\phi^2 \in \mathcal{R}^{6 \times n_2}$$

である。

ここで導出した式(15)と(16)の特徴は、分割係数行列の部分を除けば、式(5)の1台の宇宙ロボットの定式と同じ形式になることであり、ロボットが3台以上の場合でも、同様の結果となる。このことは、図2のタイプの複数台の宇宙ロボットシステムは、対象物体を把持する1台の宇宙ロボットの定式を基礎にして構築できることを意味し、その構築に必要な情報は、各ロボットが対象物体を把持している位置、対象物体の質量中心および注目点の相対位置情報である。この性質は、複数台のロボットが作業し、そのシステム構造が変化することが想定される宇宙ロボットシステムの制御などを考える場合には、有効な性質であると考えられる。

ここでは表現上の理由から、R-O-Rシステムの並

進運動量、角運動量保存則式(6)を式(11)と(12)に分割し、それぞれの式を $(v_0^T, \omega_0^T)^T$ について解いた。しかし一般的には、式(13)と(14)は、式(6)の解とはならない。ただし、分解速度制御問題においては、ここで提案した分割法は有効であり、式(11)と(12)に基づいた分解速度制御則(5・3節参照)は、制御目的を達成することができる(付録)。

以下では、式(15)と(16)をそれぞれ、ロボット1とロボット2の運動学関係式とみなす。

4・3 冗長自由度の比較 伊藤らによれば、マニピュレータの冗長自由度(Redundant Degree of Freedom: R. D. O. F.)は、以下のように定義されている⁽¹¹⁾。

$$R.D.O.F. \triangleq n - m$$

ここで、 n は関節変数ベクトルの次数、 m は作業変数ベクトルの次数である。

表1は、上記の定義に基づき、R-O-Rシステムの冗長自由度を求めた結果を示している。また、表1中の数字は、七自由度マニピュレータをもつ宇宙ロボットによる、三次元空間における作業($n=14, n_1=n_2=7$)の場合の冗長自由度である。

この表より、ロボット1とロボット2に分割した場合、冗長自由度が減少することがわかる。

5. 分解速度制御

本章では、R-O-Rシステムに対する分解速度制御について述べる。

5・1 統合形分解速度制御 運動学関係式を分割しない場合[式(7)], 分解速度制御則は次式で与えられる。

$$\dot{\phi}_{cd} = [J_{int}^*]^+ \nu_d + (E - [J_{int}^*]^+ J_{int}^*) k \dots\dots\dots (17)$$

ここで、

$\dot{\phi}_{cd}$: 関節角速度指令値

ν_d : 目標作業変数ベクトル

k : 任意の n 次元ベクトル

$[J_{int}^*]^+$: J_{int}^* の疑似逆行列である。

Table 1 Redundant degree of freedom

Partition	R.D.O.F.	
No Partition (Eq.(7))	$n - 6$ 8	
Translation & Rotation (Eq.(9), (10))	$n_1 - 3$ 4	$n_2 - 3$ 4
Robot1 & Robot2 (Eq.(15), (16))	$n_1 - 6$ 1	$n_2 - 6$ 1

本論文では、この制御則を統合形分解速度制御則 (Integrated Resolved Motion Rate Control Law) と呼ぶ。

5・2 作業分散形分解速度制御 運動学関係式を並進運動を表す部分と、回転運動を表す部分に分割する場合 [式(9), (10)], 分解速度制御則は次式で与えられる。

$$\dot{\phi}_{ca}^1 = [J_{int}^{*1}]^+ (\dot{\mathbf{p}}_{intd} - \mathbf{J}_{int}^{*2} \dot{\phi}^2) + (\mathbf{E} - [J_{int}^{*1}]^+ \mathbf{J}_{int}^{*1}) \mathbf{k}_1 \dots\dots\dots (18)$$

$$\dot{\phi}_{ca}^2 = [J_{int}^{*2}]^+ (\boldsymbol{\omega}_{0d} - \mathbf{J}_{int}^{*1} \dot{\phi}^1) + (\mathbf{E} - [J_{int}^{*2}]^+ \mathbf{J}_{int}^{*2}) \mathbf{k}_2 \dots\dots\dots (19)$$

ここで、

$\dot{\phi}_{ca}^k$: ロボット k の関節角速度指令値

$\dot{\mathbf{p}}_{intd}$: 目標注目点速度ベクトル

$\boldsymbol{\omega}_{0d}$: 目標捕捉物体回転速度ベクトル

\mathbf{k}_k : 任意の n 次元ベクトル

である。

式(18)の $\mathbf{J}_{int}^{*2} \dot{\phi}^2$ と式(19)の $\mathbf{J}_{int}^{*1} \dot{\phi}^1$ は、ロボット1とロボット2の間の相互作用を補償する信号である。

これは、ロボット1とロボット2の間で通信を行うことにより実現される。

本論文では、この制御則を作業分散形分解速度制御則 (Work Assignment Resolved Motion Rate Control Law) と呼ぶ。

5・3 独立形分解速度制御 運動学関係式をロボット1に関する部分と、ロボット2に関する部分に分割する場合 [式(15), (16)], 分解速度制御則は次式で与えられる。

$$\dot{\phi}_{ca}^1 = [J_{int}^{*1}(\alpha)]^+ \mathbf{v}_\alpha + (\mathbf{E} - [J_{int}^{*1}(\alpha)]^+ \mathbf{J}_{int}^{*1}(\alpha)) \mathbf{k}_1 \dots\dots\dots (20)$$

$$\dot{\phi}_{ca}^2 = [J_{int}^{*2}(\alpha)]^+ \mathbf{v}_\alpha + (\mathbf{E} - [J_{int}^{*2}(\alpha)]^+ \mathbf{J}_{int}^{*2}(\alpha)) \mathbf{k}_2 \dots\dots\dots (21)$$

式(20)と(21)には、それぞれ、ロボット2とロボット1の状態は含まれていない。したがって、この制御則では、ロボット1とロボット2でタイミングをとるために必要な制御動作初期における通信以外に、ロボット1とロボット2の間で通信を行う必要がない。そこで本論文では、この制御則を独立形分解速度制御則 (Independent Resolved Motion Rate Control Law) と呼ぶ。

5・4 計算量の比較 表2に、七自由度マニピュレータを持つ宇宙ロボットによる、三次元空間における作業 ($n=14, n_1=n_2=7$) の場合の、分解速度制御則の計算量を示す。

この表より、作業分散形分解速度制御則は、他の分解速度制御則よりも、計算量が極端に少ないことがわ

Table 2 Computational complexity

Control Law	multiply	add
Integrated	568	526
Work Assignment	122	110
Independent	337	295

かる。

6. 計算機シミュレーション

本章では、5章で提案した分解速度制御則の有用性を検証するために、二次元モデルによる、計算機シミュレーションを行う。

6・1 分解速度制御則の離散化 分解速度制御則をデジタルコンピュータで実現するためには、分解速度制御則の離散化を行う必要がある。本論文では、提案した分解速度制御則を以下のように離散化した。また、ベクトル \mathbf{k} は $\mathbf{0}$ に設定した。さらに、追従誤差を補償するために、各制御則には、誤差のフィードバック $-\mathbf{A}\mathbf{e}(k)$ が付加されている。

(1) 統合形分解速度制御則

式(17)より、離散時間制御則は次式とする。

$$\dot{\phi}_{ca}(k) = [J_{int}^*(k, k-1)]^+ \{ \mathbf{v}_\alpha(k+1) - \mathbf{A}\mathbf{e}(k) \} \dots\dots\dots (22)$$

$$\dot{\phi}_{ca}(k) = [J_{int}^*(k-1, k)]^+ \{ \mathbf{v}_\alpha(k+1) - \mathbf{A}\mathbf{e}(k) \} \dots\dots\dots (23)$$

ここで、

$$\mathbf{v}_\alpha(k) \triangleq \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{p}_{intd}(k) \\ \Delta \phi_{0d}(k) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{e}(k) \triangleq \begin{pmatrix} \mathbf{e}_p(k) \\ \mathbf{e}_\phi(k) \end{pmatrix}$$

$$\Delta \mathbf{p}_{intd}(k) \triangleq \{ \mathbf{p}_{intd}(k+1) - \mathbf{p}_{intd}(k) \} / T$$

$$\Delta \phi_{0d}(k) \triangleq \{ \phi_{0d}(k+1) - \phi_{0d}(k) \} / T$$

$$\mathbf{e}_p(k) \triangleq \mathbf{p}_{intd}(k) - \mathbf{p}_{int}(k)$$

$$\mathbf{e}_\phi(k) \triangleq \phi_{0d}(k) - \phi_0(k)$$

$$\mathbf{A} \triangleq \text{diag} \{ \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \}$$

である。また、 T はサンプリング周期である。

ロボット1では、式(22)より、 $\dot{\phi}_{ca}(k)$ を計算した後、 $\dot{\phi}_{ca}(k)$ の上半分の要素、つまり $\dot{\phi}_{ca}^1(k)$ を制御入力とする。ロボット2では、式(23)より、 $\dot{\phi}_{ca}(k)$ を計算した後、 $\dot{\phi}_{ca}(k)$ の下半分の要素、つまり $\dot{\phi}_{ca}^2(k)$ を制御入力とする。

(2) 作業分散形分解速度制御則

式(18)と(19)より、離散時間制御則は次式とする。

$$\dot{\phi}_{ca}^1(k) = [J_{int}^{*1}(k, k-1)]^+ \{ \Delta \mathbf{p}_{intd}(k+1) - \mathbf{J}_{int}^{*2}(k, k-1) \dot{\phi}_{ca}^2(k-1) - \mathbf{A}_p \mathbf{e}_p(k) \} \dots (24)$$

$$\dot{\phi}_{ca}^2(k) = [J_{int}^{*2}(k-1, k)]^+ \{ \Delta \phi_{0d}(k+1) - \mathbf{J}_{int}^{*1}(k-1, k) \dot{\phi}_{ca}^1(k-1) - \mathbf{A}_\phi \mathbf{e}_\phi(k) \} \dots (25)$$

ここで、

Table 3 Physical parameters of the space robots

	Link1, 2	Link3
Mass [kg]	100.0	1000
Moment of Inertia [kgm ²]	33.33	333.3
Length [m]	2.0	2.0

Table 4 Physical parameters of the floating object

	Object
Mass [kg]	1000
Moment of Inertia [kgm ²]	333.3
Length [m]	2.0

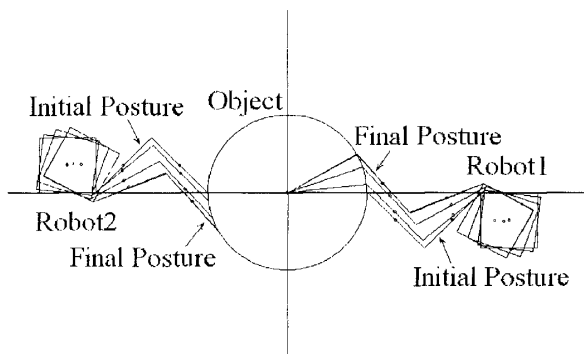


Fig. 3 Simulation result

$$\mathbf{A}_p \triangleq \text{diag} \{ \lambda_{p1}, \lambda_{p2} \}, \quad \mathbf{A}_\phi \triangleq \lambda_\phi$$

である。

(3) 独立形分解速度制御則

式(20)と(21)より、離散時間制御則は次式とする。

$$\dot{\phi}_{ca}^1(k) = [\mathbf{J}_{int}^{*1}(k, \alpha)]^\dagger \{ \mathbf{v}_d(k+1) - \mathbf{A}e(k) \} \cdots (26)$$

$$\dot{\phi}_{ca}^2(k) = [\mathbf{J}_{int}^{*2}(k, \alpha)]^\dagger \{ \mathbf{v}_d(k+1) - \mathbf{A}e(k) \} \cdots (27)$$

ここで、 $\mathbf{J}_{int}^{*1}(m, n)$ 、 $\mathbf{J}_{int}^{*2}(m, n)$ と $\mathbf{J}_{int}^{*k}(m, n)$ は、時刻 mT におけるロボット1の関節角と、時刻 nT におけるロボット2の関節角からなる一般化ヤコビ行列である。

式(22)から(27)においては、演算時間として、1サンプリング周期のむだ時間を考慮している。さらに、式(22)から(25)においては、通信時間として、1サンプリング周期のむだ時間を考慮している。

6・2 シミュレーション条件 シミュレーションは、以下に示す条件で行った。

宇宙ロボットおよび浮遊物体の物理パラメータは、表3および4に示すように設定した。

サンプリング周期 T およびフィードバックゲイン λ_i はそれぞれ、 $T=0.01$ s と $\lambda_i=-0.3$ とした。また、自律形分解速度制御における分割係数 \mathbf{A} は、 $0.5\mathbf{E}$ とした。

6・3 シミュレーション結果 宇宙ロボットに、捕捉物体を、その質量中心は固定したまま、 30.0 deg

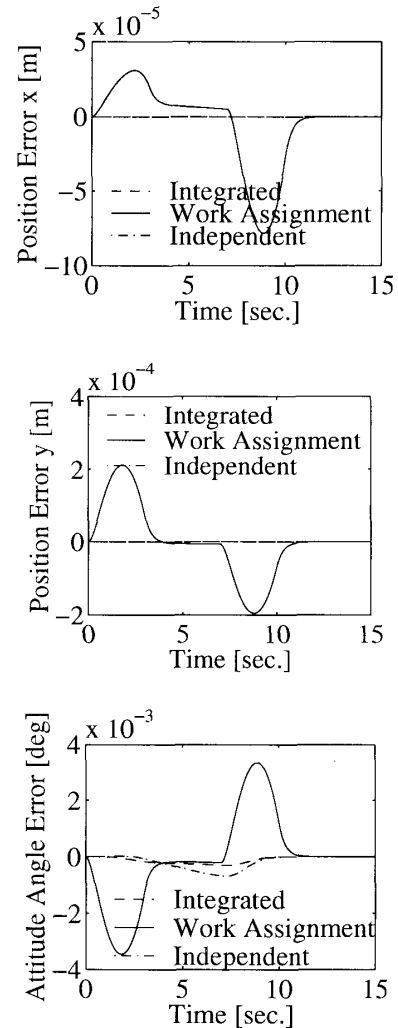


Fig. 4 Time history of tracking error

回転させた場合のシミュレーションを行った。

統合形分解速度制御則式(22)と(23)を用いた場合のシミュレーション結果を、図3に示す。図4には、各制御則を用いた場合の追従誤差を比較したグラフを示す。

シミュレーション結果から、いずれの制御手法も良好な制御性能を示していることがわかる。ただし、作業分散形分解速度制御の制御性能は、他の二つの場合と比較するとやや劣る。これは、通信時間遅れのために、相互作用補償が遅れるためである。

7. おわりに

本論文では、2台の宇宙ロボットおよび浮遊物体からなるシステムの運動学関係式を導出する方法について述べた。本手法は、3台以上の宇宙ロボットからなるシステムに対しても、容易に拡張可能である。

また、2種類の運動学関係式分割法を提案し、その分割された運動学関係式に基づいた分解速度制御則を

導いた。さらに、その分解速度制御則の有用性を、計算機シミュレーションにより確認した。

最後に、本研究を行う際に協力いただいた九州工業大学大学院生中塚敬一君（現 日本電気(株)）に深く感謝する。

付 録

ここでは、独立形分解速度制御則式(20)と式(21)が、制御目的 ($\nu = \nu_d$) を達成できることを示す。

R-O-R システムの並進運動量、角運動量保存則式(6)に、式(2)を代入すると、

$$\begin{aligned} H_0 \begin{pmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{pmatrix} + H_\phi \dot{\phi} \\ = H_0 J_0^{-1} \nu + H_\phi^1 \dot{\phi}^1 + H_\phi^2 \dot{\phi}^2 = 0 \dots \dots \dots (28) \end{aligned}$$

となる。次に、この式(28)に、独立形分解速度制御則式(20)と(21)を代入すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} H_0 J_0^{-1} \nu + H_\phi^1 \dot{\phi}^1 + H_\phi^2 \dot{\phi}^2 \\ = H_0 J_0^{-1} \nu + H_\phi^1 \{ [J_{int}^{*1}(A)]^\dagger \nu_d \\ + (E - [J_{int}^{*1}(A)]^\dagger J_{int}^{*1}(A)) k_1 \} \\ + H_\phi^2 \{ [J_{int}^{*2}(A)]^\dagger \nu_d \\ + (E - [J_{int}^{*2}(A)]^\dagger J_{int}^{*2}(A)) k_2 \} \\ = H_0 J_0^{-1} \nu - (H_0^1 + A H_0^0) J_0^{-1} \nu_d \\ - \{ H_0^2 + (E - A) H_0^0 \} J_0^{-1} \nu_d \\ + H_\phi^1 (E - [H_\phi^1]^\dagger H_\phi^1) k_1 + H_\phi^2 (E - [H_\phi^2]^\dagger H_\phi^2) k_2 \\ = H_0 J_0^{-1} \nu - H_0 J_0^{-1} \nu_d \\ + (H_\phi^1 - H_\phi^0) k_1 + (H_\phi^2 - H_\phi^0) k_2 \\ = H_0 J_0^{-1} (\nu - \nu_d) \\ = 0 \dots \dots \dots (29) \end{aligned}$$

ここで、 $H_0 J_0^{-1}$ は正則であるので、制御目的

$$\nu = \nu_d \dots \dots \dots (30)$$

が達成される。

文 献

- (1) 梅谷陽二, 宇宙ロボットのめざす軌道とターゲット, 日本ロボット学会誌, 7-1(1989), 72-77.
- (2) Vafa, Z. and Dubowsky, S., On the Dynamics of Manipulators in Space Using the Virtual Manipulator Approach, *Proc. 1987 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1987), 579-585.
- (3) 梅谷陽二・吉田和哉, 一般化ヤコビ行列を用いた宇宙用ロボットマニピュレータの分解速度制御, 日本ロボット学会誌, 7-4(1989), 327-337.
- (4) 荒井裕彦・谷江和雄・館 暉, 宇宙ロボットの外乱補償制御, 日本ロボット学会誌, 10-4(1992), 481-489.
- (5) Xu, Y., Kanade, T. and Lee, J., Parameterization and Adaptive Control of Space Robot Systems, *IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems*, 30-2(1994), 435-451.
- (6) 山本俊彦・小林順・大川不二夫・加藤了三, 宇宙用マニピュレータのデジタル適応制御, 機論, 62-593, C (1996), 168-174.
- (7) 小林順・山本俊彦・加藤了三・大川不二夫・日野英一, 宇宙用マニピュレータのデジタル適応制御 (第2報, 一般化ヤコビ行列の簡単化の妥当性), 機論, 64-617, C (1998), 156-162.
- (8) 木村浩・王至東, 複数移動体ロボットによる宇宙構造物の操り (第1報, 操りの基礎理論), 機論, 59-559, C (1993), 855-861.
- (9) 王至東・木村浩, 複数移動体ロボットによる宇宙構造物の操り (第2報, 操りの基礎実験), 機論, 59-559, C (1993), 862-867.
- (10) 吉田和哉・倉爪亮・梅谷陽二, 宇宙ロボットの多腕協調制御, 日本ロボット学会誌, 9-6(1991), 718-726.
- (11) 伊藤宏司・伊藤正美, 生体とロボットにおける運動制御, (1991), 51, 計測自動制御学会.