



部品給配ロボットの開発 (第2報)*

—その運動性能の評価—

李 沢群** 神谷好承*** 青柳誠司*** 岡部佐規一*** 横山恭男†

Development of the Parts Supplying Robot (2nd Report)
—Evaluation of Its Motion—

Tsegun LEE, Yositsugu KAMIYA, Seiji AOYAGI,
Sakiichi OKABE and Yasuo YOKOYAMA

In order to complete a flexible automated assembly system, a robot called parts supplying robot has been developed, with which one assembly line can be built compactly and parts supplying from three dimensionally stacked parts-feeding equipments can be realized easily. In this report, fundamental structure of the parts supplying robot is given. The method to select a shortest PTP path is discussed and the effect for high-speed motion of robot is shown. Its PTP motion is evaluated, and improved by using a balanced arm structure and an input compensation. Finally simulation results are shown.

Key words: assembly system, parts supplying robot, PTP motion, shortest path, balanced arm, compensation of robot motion

1. 緒 言

組立用ロボットとしてすでに SCARA 型ロボット¹⁾のように、その自由度を制限しながらも優れた組立性を有するロボットが開発されている。こうした SCARA 型ロボットはその運動形態として基本的には水平面内での作業性を指向して開発されたものである。他方、近年における多段・多重式振動フィーダ²⁾のような空間的部品供給装置の開発に見られるように、組立用ロボットにおいてもロボットの作業領域における空間運動を評価し、効率の良い運動をすることのできるロボット(部品給配ロボット³⁾)の開発が望まれている。

本研究では、これまでの従来のロボットにおいて設計上の制限を設けるなどしてとることのできなかった運動形態の中にロボット運動の PTP 動作に最も移動効率の良い運動パターンがあることを指摘し、そうした運動を積極的に用いたロボット運動を提案する。しかし時にこうした移動効率の良い運動の中にはアーム

運動中にその特異姿勢を含む場合もあるが、それを含めて有効に利用して行こうとするものである。

またロボットの構造においては高速・高精度な組立用ロボットの開発としてアーム系の重量バランスをとり、そのことによってロボットアーム系の運動方程式を完全に無干渉、線形化し、運動性能の向上を図って行こうとするものである。

2. 部品給配ロボットの機能と構成

2.1 部品給配ロボットの骨格

部品給配ロボットとしてはまずアーム系のあらゆる移動パターンをとりうる必要がある。このためアーム系の特異姿勢の一つであるアーム系が重なり合うことも可能な構造をとる。また部品給配ロボットは垂直多関節型ロボットであるためアーム系の重量バランスをとり定常位置偏差をなくすのみならず、ロボットアーム系の運動方程式を完全に無干渉、線形化し、運動補償を容易にしうる構造をとることとする。そして第2と第3アームの重量バランスウェイトにはそれぞれの駆動モータの自重を積極的に利用する構造をとる。また手首部分を除き3自由度をもたせている。以上の考え方に基いた部品給配ロボットの外観を図1に示す。

2.2 部品給配ロボットの動作形態

* 原稿受付 平成2年6月19日。1990年度精密工学会春季大会学術講演会(平成2年3月30日)にて発表

** 学生会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-1)

*** 正会員 金沢大学工学部

† 正会員 金沢大学工学部(現、石川工業高等専門学校; 石川県河北郡津幡町北中条)

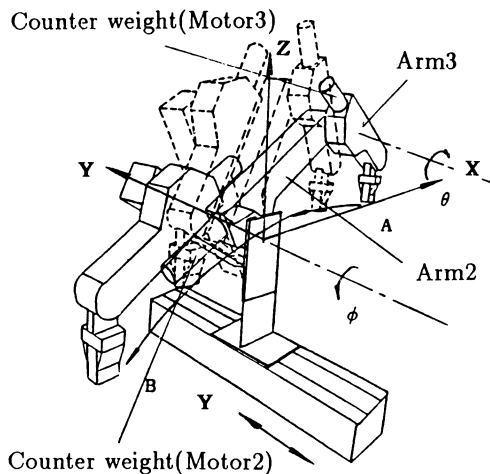


Fig. 1 A parts supplying robot

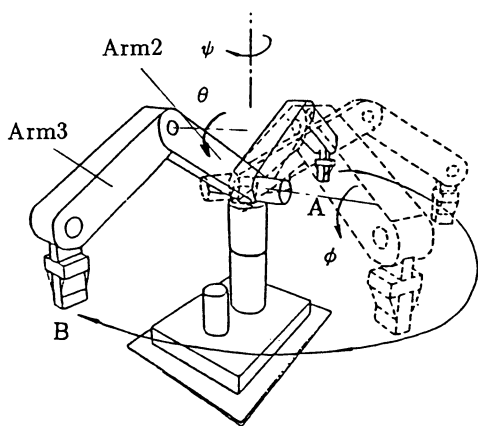


Fig. 2 A PTP motion when using a conventional multi-articulated robot

これまでに開発されている垂直多関節型ロボットの運動形態はおおむね図2に示すような移動パターンをとることが多い。しかもロボットのハードおよびソフト的制限を設けることにより一つのPTP動作における移動パターンは唯一に制限されている。これに対し、ロボットアーム系があらゆる移動パターンをとることができることを仮定し、かつアーム系の特異姿勢を通ることも厭わなければ、手首部分の自由度を除き、図2に示すような一つのPTP動作に対して合計16通りの移動パターンが存在している。すなわちロボットのPTP動作においてそのハンドが目標とする位置に位置決めされればよいと考えられるため、目標点でのアーム系の姿勢に2通りの姿勢が考えられると同時に、それぞれについて第1,第2および第3関節は時計方向と反時計方向の回転が存在しているため、図2に示すようなロボットにおいてはその総組合せ数

として $2^3=8$ 通りが存在していることになる。これよりアーム系のもつ各種の移動パターンを評価し、自動組立用ロボットとしての運動効率の良い移動パターンを選び得ることがわかる。

本研究では同じ自由度数をもたせることにおいて図1に示すような部品給配ロボットを提案している。とりわけ第1関節を旋回関節から直動関節に置き換えているが、その理由としては、自動組立ラインの作業ステーションをできるだけ密に配置しなければならないという最近の自動組立技術の要請に基づくものであり、アーム系を振り回さないことにより作業スペースを大きくとらなくても済むようにすることができるといふことと、ロボットアーム系の運動方程式が完全に線形化されるということをおねらったものである。

本研究で提案する部品給配ロボットにおいてその一つのPTP動作を考えた場合図3に示すような8種類の移動パターンが存在し、その中で6種類の移動パターンはアーム系の特異姿勢を通るものであることがわかる。特異姿勢を通る6種類の移動パターンのうちで、図3に示される(1,3,6,8)の4通りの移動パターンはその中にアーム系が重なり合うといったアーム系の特異姿勢をもつものであり、(2,3,5,6,8)の5通りの移動パターンはその中にアーム系がまっすぐ伸びきってしまうといったアーム系の特異姿勢をもつものである。8種類のそれぞれの移動パターンの中で各アームの移動量 (ϕ_i, θ_i) , $(i=1\sim8)$ を比較し、その大きい方の移動量 $\max(\phi_i, \theta_i)$ $(i=1\sim8)$ を8種類の移動パターンについてさらに比較しその中で最も小さい移動量

$$\min[\max(\phi_i, \theta_i)], (i=1\sim8)$$

をもつ移動パターンを最小移動量パスと呼ぶことにする⁴⁾。

上述の考え方に基いて各アームの移動方向を領域分けした一例を図4に示す。図4はA点をロボットアーム系の初期姿勢とし、ロボットの全作業領域内で最小移動量パスをとった場合のアームの回転方向を示すもので、ロボットが本研究で提案する最小移動量パスを選んだ場合、どの領域においてもアーム系が特異姿勢を通る可能性のあることを示していると同時にアーム系の特異姿勢を含む移動パターンの中に最小移動量パスがあり得ることを示している。これより今後ロボット運動のPTP動作においては上述したアーム系の最小移動量パスを通る運動制御を提案し、こうした移動経路を含めたロボット運動の高速化を考えることを提案したい。

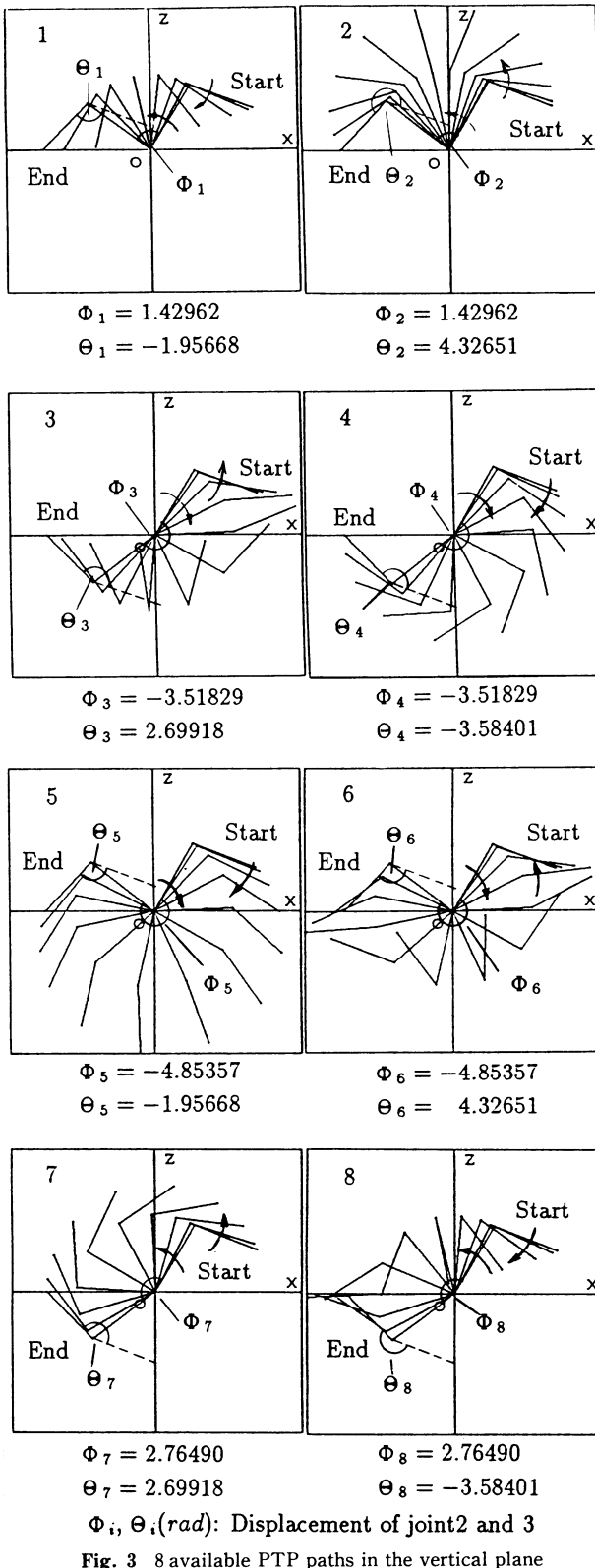


Fig. 3 8 available PTP paths in the vertical plane

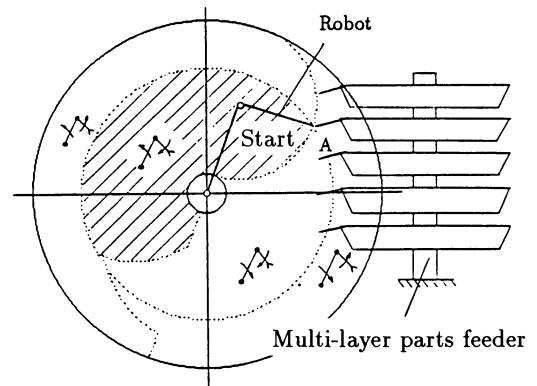


Fig. 4 4 direction areas when using the shortest paths

3. 部品給配ロボットの運動性能

3.1 部品給配ロボットの運動方程式

ロボット運動の高速・高精度化の観点から、これまでもロボットの運動方程式における重力項のみならず、ロボットの運動に伴う各種非線形力などをフィードフォワード等により補おうとする線形化補償の考え方が提案されている。これは制御則を工夫することにより運動方程式を線形化する方法であるが、一方簡単なロボットであればその機構的工夫によりロボットの運動方程式を線形化することもできる。その一つの方法が各アームの重量バランスをとることである。本研究ではこれによりロボットにおける運動方程式を線形化し、とりわけ我々が提案した小型高速組立ロボットである部品給配ロボットに適用してみようとするものである。

部品給配ロボットの動力学モデルを図5に示す。一方図6のモデルに示すような組立用ロボットとしてこれまでも多く開発されている水平多関節型ロボットをそのまま垂直平面内で用いたとすれば、各アームの重量バランスはとられておらず、このため重力項の影響により位置決め時に定常位置偏差を生じてしまい、精度の高い組立が困難になってくることが予想される。これに対し各アームの重量バランスを考慮に入れた部品給配ロボットの運動方程式は

$$\left. \begin{aligned}
 M\ddot{y} &= F_1; \text{ (第1関節)} \\
 M &: \text{アーム系の質量} \\
 J_{22}\ddot{\phi} &= T_2; \text{ (第2関節)} \\
 J_{22} &= J_2 + m_2' s_2'^2 + J_3 + (m_3 + m_3') l_2^2 \\
 J_{33}\ddot{\theta} &= T_3; \text{ (第3関節)} \\
 J_{33} &= J_3 + m_3' m_3'^2
 \end{aligned} \right\} (1)$$

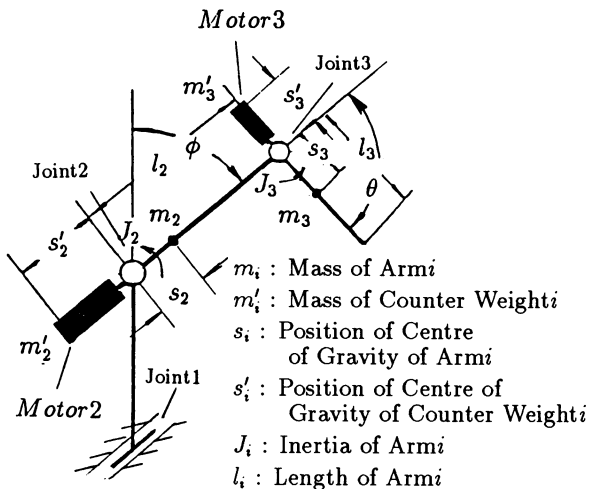


Fig. 5 Dynamic model of parts supplying robot

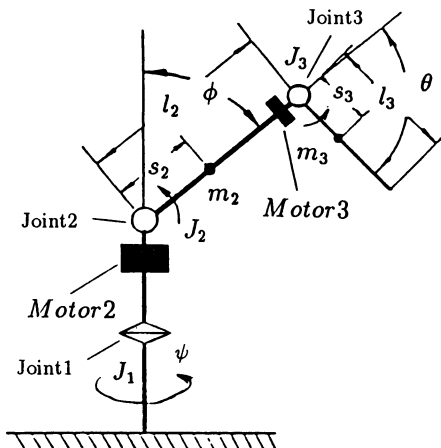


Fig. 6 Dynamic model of a conventional multi-articulated robot

のように与えられ、重力項を始めとする各種非線形項がなくなってしまうと同時に、非常に簡単な運動方程式でその運動が表現されることがわかる。実際には供給する部品の重量により常にバランスを保っていることは難しいが、アーム本体と比較して軽量の部品を供給する場合には、本研究の提案する線形化がほぼ成立していることができる。

参考のために図6に示すロボットの動力学モデルによる運動方程式を付録に示す。

3.2 部品給配ロボットの運動

部品給配ロボットはその運動形態としてアーム系の最小移動量パスをとることを仮定している。従来のロボットではロボットの特異点を通る移動姿勢は設計上の制限を設けることにより避けるようにしてきているが、こうした最小移動量パスを考慮したロ

ボットの PTP 動作の場合、図3における1番目の図に示すように第2と第3アームがそれぞれ異なった回転方向に運動を開始し、その特異姿勢を通る動作により PTP 動作を完了する運動形態も存在する。ここではこの図に示した作業例を取り上げ、重量バランスをとったロボットとそうでないロボットについてその動特性を比較し、重量バランスの効果を評価する。

各関節を台形速度曲線で加減速させる PTP 動作を目標値とし、その時の追従制御性能を図7と図8に示す。図7は重量バランスをとっていない従来型ロボットを用いて同じ作業を行わせた時の運動性能であり、図8は重量バランスをとったロボットにおける運動性能である。各関節におけるサーボ系を含めたアーム系の固有周期をそれぞれ 10 Hz としたとき、重量バランスをとっていない従来型ロボットにおける定常位置偏差は図7(b)よりアーム先端で

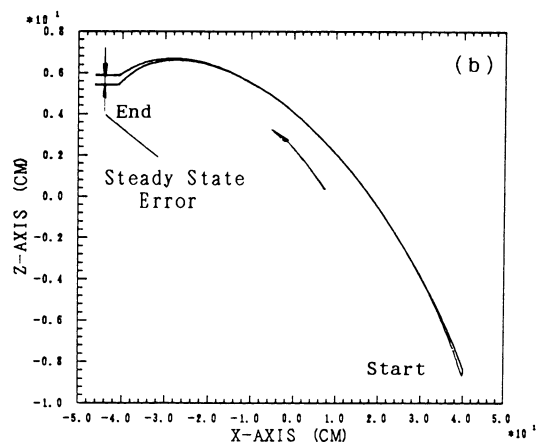
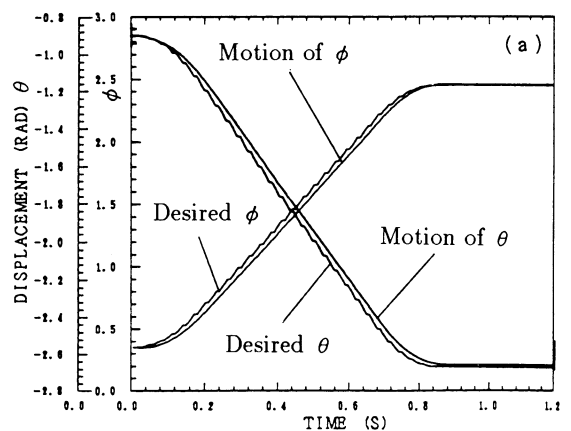


Fig. 7 Displacement of joints and trajectory of end-effector when using a conventional multi-articulated robot

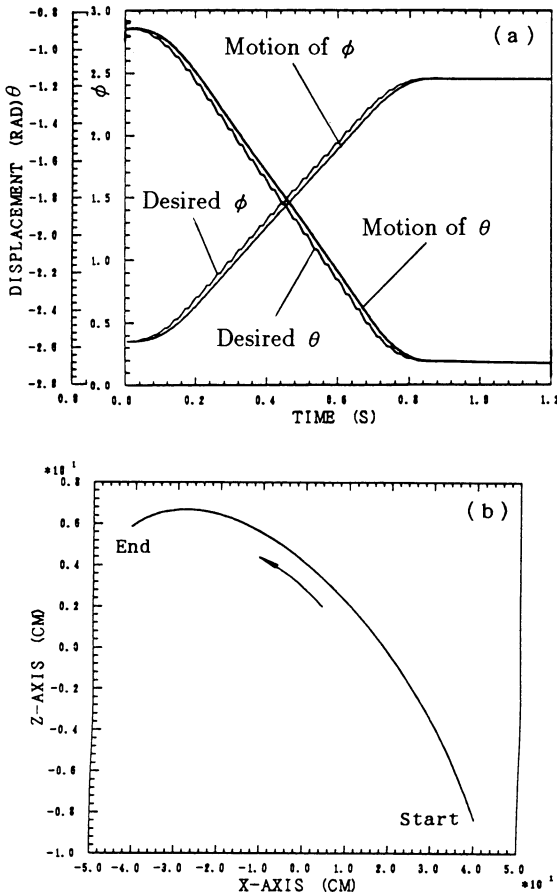


Fig. 8 Displacement of joints and trajectory of end-effector when using a parts supplying robot

4 mm 程度生じていることがわかる。こうした定常位置偏差は組立用ロボットとしては無視しがたい量であり、もちろん重量バランスをとったロボットにおいては図 8 (b) に示すように定常位置偏差は見られない。

3.3 部品給配ロボットにおける運動補償

部品給配ロボットのようにアーム系の重量バランスをとることにより系の運動方程式を完全に無干渉、線形化することができればロボット運動の補償を容易に行うことができる。例えば、図 7 と図 8 に示すように実際の関節の運動はその目標値より遅れることがあり、こうした遅れは PTP 運動ではさほど問題にならないにしても、連続軌跡制御の場合には軌跡精度に影響を与えることが予想される。これより運動補償の例としてこの遅れをなくすことを考えてみる。

部品給配ロボットの運動方程式は前述したようにモータ単体を駆動しているような線形かつ無干渉な運動特性をもつため、入力を q_d (目標値) とし出力を q とした場合、その運動特性は各アームがそれぞれ独

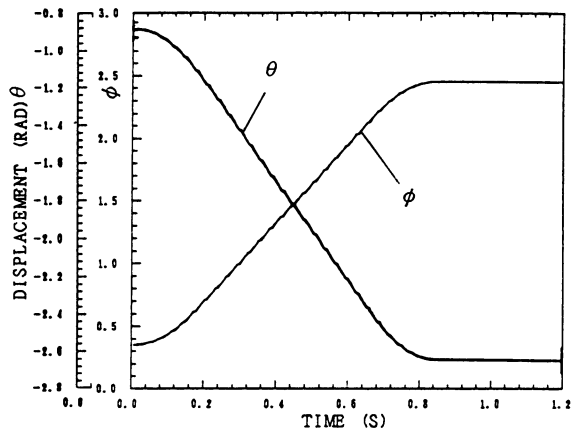


Fig. 9 Effect of compensation when using a parts supplying robot

立した式 (2) に示すような単純な 2 次系として表現できる。

$$J\ddot{q} + k_v\dot{q} + k_p(q - q_d) = 0 \quad (2)$$

ここで入力 q_d と出力 q の間に生じる遅れをなくすために $q = q_d$ を満足するような新たな運動補償された入力 Q_d を定義することにする。新たな入力 Q_d は $q = q_d$ という理想的な運動を仮定することにより

$$J\ddot{q}_d + k_v\dot{q}_d + k_p(q - Q_d) = 0 \quad (3)$$

を用い

$$Q_d = \frac{J\ddot{q}_d + k_v\dot{q}_d + k_p q_d}{k_p} = \frac{\ddot{q}_d + 2\zeta\omega_n\dot{q}_d + \omega_n^2 q_d}{\omega_n^2} \quad (4)$$

のように定義される。こうして運動補償を考慮した新たな目標値 Q_d を入力した時の部品給配ロボットの運動性能を図 9 に示す。これよりサーボ系による目標値との遅れは完全になくなっていることがわかる。

一方、同じ入力 Q_d を従来型ロボットに入力した時のロボットの運動性能を図 10 に示す。このシミュレーション結果より重量バランスをとらないロボットにおいても目標値との遅れはほとんどなくなっていることがわかるが、定常位置偏差についての改善はみられない。この例の場合には遠心力やコリオリ力などの非線形力、あるいはアーム相互の干渉力等の影響がサーボ系の遅れに比べれば小さいことを意味しているが、関節速度がもっと高い場合においては非線形項や干渉力の影響により運動補償の効果が低減してくることが予想される。一方重量バランスをとった部品給配ロボットにおいては系は線形かつ無干渉であるため、運動補償の効果は関節速度に影響されない。

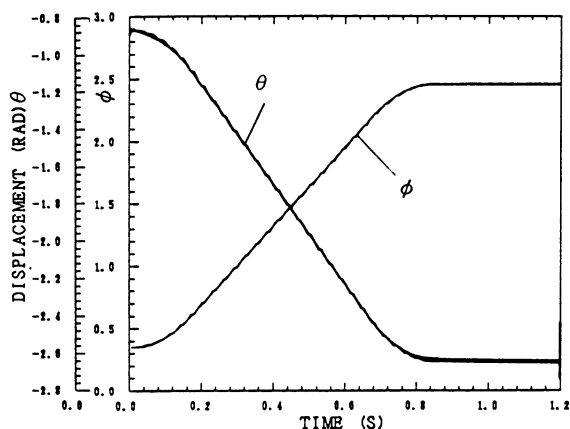


Fig. 10 Effect of compensation when using a conventional multi-articulated robot

4. 結 論

組立用ロボットとして新しく部品給配ロボットの概念を提案した。この中でロボット運動のPTP動作において最小移動量パスといった最も移動効率のよい運動形態を提案すると同時に、アーム系の重量バランスをとり部品給配ロボットの運動方程式を完全に無干渉かつ線形化することにより動特性改善のための運動補償が可能なことを示し、ロボット運動の高速・高精度化をより容易に実現できることを示した。

[付 録]

$$J_{11}\ddot{\phi} + K_{112}\dot{\phi}\dot{\theta} + K_{113}\dot{\phi}\dot{\theta} = T_1 \quad (\text{第1関節})$$

$$J_{11} = J_1 + (J_2 + m_3 l_2^2) \cos^2 \phi + J_3 \cos^2(\phi + \theta)$$

$$+ m_3 l_2 s_3 \cos \phi \cos(\phi + \theta)$$

$$K_{112} = -(J_2 + m_3 l_2^2) \sin 2\phi - J_3 \sin 2(\phi + \theta)$$

$$- m_3 l_2 s_3 \sin(2\phi + \theta)$$

$$K_{113} = -J_3 \sin 2(\phi + \theta) - m_3 l_2 s_3 \cos \phi \sin(\phi + \theta)$$

$$J_{22}\ddot{\theta} + J_{23}\ddot{\phi} + K_{223}\dot{\phi}\dot{\theta} + D_{21}\dot{\phi}^2 + D_{23}\dot{\theta}^2 + G_2 = T_2$$

(第2関節)

$$J_{22} = J_2 + J_3 + m_3 l_2^2 + 2m_3 l_2 s_3 \cos \theta$$

$$J_{23} = J_3 + m_3 l_2 s_3 \cos \theta$$

$$K_{223} = -2m_3 l_2 s_3 \sin \theta$$

$$D_{21} = \frac{1}{2} (J_2 + m_3 l_2^2) \sin 2\phi + \frac{1}{2} J_3 \sin 2(\phi + \theta)$$

$$+ m_3 l_2 s_3 \sin(2\phi + \theta)$$

$$D_{23} = -m_3 l_2 s_3 \sin \theta$$

$$G_2 = (m_2 s_2 + m_3 l_2) g \cos \phi + m_3 s_3 g \cos(\phi + \theta)$$

$$J_{32}\ddot{\phi} + J_{33}\ddot{\theta} + D_{31}\dot{\phi}^2 + D_{32}\dot{\phi}^2 + G_3 = T_3 \quad (\text{第3関節})$$

$$J_{32} = J_3 + m_3 l_2 s_3 \cos \theta$$

$$J_{33} = J_3$$

$$D_{31} = \frac{1}{2} (J_2 + m_3 l_2^2) \sin 2\phi + \frac{1}{2} J_3 \sin 2(\phi + \theta)$$

$$+ m_3 l_2 s_3 \sin(2\phi + \theta)$$

$$D_{32} = m_3 l_2 s_3 \sin \theta$$

$$G_3 = m_3 g s_3 \cos(\phi + \theta)$$

参 考 文 献

- 1) 牧野 洋, 村田 誠, 古屋信幸: SCARA ロボットの開発, 精密機械, 48, 3 (1982) 378.
- 2) 横山恭男, 岡部佐規一, 塩沢 晃, 渡辺元司: 平衡型振動フィーダの開発, 精密機械, 51, 5 (1985) 106.
- 3) T. Lee, Y. Kamiya, S. Okabe, Y. Yokoyama & T. Togami: Development of Parts Supplying Robot, Proc. 10th Int. Conf. on Assembly Automation, (1989) 173.
- 4) 李 沢群, 神谷好承, 岡部佐規一, 横山恭男, 戸上常司: 部品給配ロボットの開発 (第1報), 精密工学会誌, 56, 9 (1990) 1659.