複数台ロボットによる協調作業経路計画

山本元司* 黒田創明** 毛利彰*

A Path Planning for Coordinated Work by Multi-Robot System

Motoji YAMAMOTO Soumei KURODA Akira MOHRI

This paper discusses a path planning problem for a coordinated work by multi-robot system. The problem is how to move each robot's arm cooperatively to execute specified works. Various styles of coordinated work, which is based on the classification from a kinematic point of view for the relation of each robot's end-effector, are discussed. Mainly in this paper, a work while one robot is holding or carrying a workpiece, another robot executes a specified work with tools, is developed as a typical example of an interest coordinated work. The redundancy peculiar to the coordinated work is presented by the kinematic analysis of two-robot system. An algorithm to plan a coordinated motion is proposed by using the redundancy. As numerical examples, the proposed method is applied to a coordinated motion planning by two planar manipulators with three-links.

Key Words : Coordinated work, Motion planning, Redundant degrees of freedom, Multi-robot system

1. ま え が き

従来主に単体のロボットにより行ってきた作業に対し、複数台ロボットを協調的に動作させてその作業を遂行することが考えられている。これはこのような協調作業は単体のロボットによる作業にないいくつかの特長を持つと考えられているからである。例えば細長い重量物のワークの移動は、機構的にオープンループの形態をとることの多い単体のロボットでは苦手の作業であるが、2台のロボットを用いると、一台あたりのワークの重量による負荷が半減されるばかりでなく、クローズドループの機構となることで、モーメントによる負荷が大幅に軽減される。また、複数台のロボットによる作業により実質的な作業域が拡大し、より良い作業姿勢を確保し易いことや、単体のロボットでは実現困難な複雑で高精度な作業軌跡を描くことができること等が考えられる。しかしこのような複数台ロボットシステムを用いた協調作業は、単体のロボットによる作業に比べ、協調的な動作制御が複雑になり、実際にはいくつかの例^{1),2)}を除きそれほど

実現されていないのが現状である。

初期の複数台ロボットによる協調動作の研究は、この問題が多指ハンドの動作制御の問題ときわめて類似していることから、多指ハンドに関する多くの研究で議論された把持力の最適化問題や、協調的操り問題などについて、これを複数台ロボットの協調動作問題として扱っている多くの研究^{3),4),5)}がある。また、多指ハンドの研究ではそれほど問題とされていなかった、ダイナミクスの問題が複数台ロボットによる動作制御においては意味を持つため、作業対象物のダイナミクスを考慮したうえでの制御法⁶⁾や両手協調動作のためのハイブリッド制御系を構成する方法⁷⁾などが検討されている。また一つの物体を2台のロボットで移動する場合の移動時間を最短にする関節トルクを計算する問題も検討されている^{8),9),10)}。

一方、協調ロボットシステムの多くは運動学的に冗長な自由度を持つことから単体の冗長ロボットでの研究において議論されてきた手法を複数台の協調ロボットシステムに適用しようとする研究がなされている。このような研究として、Dauchez ら¹¹⁾は2台協調ロボットの運動学式の冗長性の利用を検討し、Kumar ら¹²⁾は複数台ロボットシステムの運動学的性能指標を検討している。

原稿受付 1992 年 2 月 13 日

* 九州大学工学部 ** 九州大学大学院

また Lee ら¹³⁾は複数台ロボットシステムにおいて、各ロボットの可操作楕円体を計算し、これらの交差領域の体積でシステムの運動学的性能を評価している¹³⁾。さらに、Chiacchio ら¹⁴⁾は複数台ロボットシステムの一般的な運動学の定式化から、複数台ロボットシステムに拡張した可操作楕円体を定義している。

ところで複数台ロボットシステムを用いて実際に与えられた作業を行うためには、各ロボットがどのような作業姿勢で、どのように関節を協調動作させるかを考えなければならない。これは協調作業経路計画問題と呼ぶことができるが、協調ロボットシステムにおける運動学的な自由度と拘束条件をどう扱うかが問題であり、この問題を検討している研究は現在のところ比較的少ない。関連する研究としては、Jouaneh らによるポジショニングテーブルと多関節型ロボットによる協調動作を用いて、作業座標でロボット手先を鋭いコーナーを減速せず通過させるための協調的な関節軌道生成問題を扱った研究^{15),16)}や、Carriker らによるベースが移動可能な協調ロボットシステムにより、与えられた作業経路を実現する協調作業経路のなかで定義したコストを最小にする経路を計画する問題を検討したもの¹⁷⁾がある。しかし、これらは複数台ロボットの協調による一般的な作業形態を検討しているわけではなく、特殊な作業に限定しての経路計画問題を扱っている。

そこで本研究では与えられた作業を実現するための協調的な作業形態の検討と、この検討から示される興味ある複雑な協調作業形態の典型的な実現例として、2台のロボットすなわち、ワークを保持したロボットと、作業のための工具を装着したロボットによる協調動作を検討し、与えられた作業を実現するための協調作業経路計画問題に対する具体的な経路生成法を提案する。以下、2章で複数台ロボットによる協調作業形態の検討をおこなう、3章では複雑な協調作業の一例として、2台のロボットによる同時協調的な作業の運動学解析をおこなう。さらに4章ではこの問題に対する協調作業経路計画法の提案をして、具体的なアルゴリズムを示す。5章では2台の平面3リンクロボットによるいくつかの協調作業関節経路の例題を示し、経路計画法の有効性を確認する。

2. 複数台ロボットによる協調形態

現在までの協調動作の研究の多くは一つの対象物を操作、移動させる作業を取り扱っている。しかし、より複雑な作業形態を考えることもできる。例えば Fig. 1 に見られるナイフを用いたリンゴの皮剥き作業を考えてみよう。これは右手(腕)と左手(腕)による協調作業の一例である。右手でナイフを持ち、皮を剥く動作をおこ

Fig. 1 A coordinated work to pare an apple

なっているが、同時に左手も単にリンゴを固定しているだけでなく、皮剥きの動作にも貢献している。このことは固定されたリンゴをナイフを持った右手のみで皮を剥くことはたいへん難しいし、固定されたナイフを用いてリンゴを持った左手のみで皮を剥くことも困難であることから理解できる。

そこでこのような協調動作による作業形態をより一般的に考え、複数台ロボットによる一般的な協調作業形態を検討する。ロボットによる協調作業、あるいは協調動作という言葉は、多くの研究の中で様々な意味に用いられており、必ずしも明確な定義づけがなされているわけではない。従って混乱を防ぐために、本研究で考える協調動作の定義をしておくべきであろう。その定義として、ここでは複数台のロボットがある作業を行っているとして、“任意に選ばれた2台のロボットが与えられた作業を実現するために協調動作をおこなっている”とは、

1. 2台のロボットは同時に一つの作業を行っている。
2. もしどちらか一方でも動作を停止したなら、与えられた作業の遂行は不可能になるかまたは困難になる。

の2つの条件を満たす場合を言うことにする。ここで若干の補足をしておく。ここでの定義は複数台のロボットシステムのなかで特定の2台のみに注目し、その2台の関係においての協調を考えている。従ってより上のクラスすなわち、多くのロボット相互の関係を考える場合における協調の問題はここでは取り扱わない。また、これはロボットによる作業を実現するうえでの協調を定義したものであり、別の観点からの協調の定義ももちろんありうる。さて、このように定義された協調動作により協調作業をおこなう2台のロボットの両手先の位置と姿勢に着目して、運動学的な視点から見れば Table 1 のように協調作業を分類することが可能である注1)。

注1) この分類は内山らが述べている密結合、疎結合、非結合⁷⁾という分類に類似しているが、ここでは作業の実現という観点からの分類であること、より具体的な定義づけを行っている点で異なり、分類の意味づけも多少異なる。

Table 1 Classification of coordinated work

classification based on kinematical relation	example of coordinated work	degrees of freedom
A) complete restricted coordinated work		holding, carrying, manipulation small
B) partially restricted coordinated work		welding, painting, pasting medium
C) no restricted coordinated work		spray painting large

A) 完全拘束協調作業：

作業中に両ロボットの手先位置（姿勢）の相対変化はしない。具体的な作業としては Table 1 に見られるように、一つの物体をしっかりとつかんで移動、操作する場合が考えられる。

B) 部分拘束協調作業：

手先位置（姿勢）の相対的変位はあるが、ある幾何学的関係により部分的に拘束される。作業としては溶接、糊付け、絵つけなどが考えられる。

C) 非拘束協調作業：

手先位置（姿勢）の相対的關係は衝突の問題を除けば基本的に自由である。例として、Table 1 に見られるような塗装作業が考えられる。

A) の作業形態は複数台ロボットシステムの協調動作に関する研究でよく取り上げられてきたものであり、システム全体としての運動学的な自由度は小さい。また C) の作業形態における経路計画として問題となるのは、主として複数台ロボットによる衝突回避問題であろう。この問題についての研究もいくつかなされている。興味深いのは B) の場合の作業形態である。従来このような作業形態はあまり検討されていなかった。B) に分類される作業は理論的にはいくらでも考えられるが、現実的、典型的な例として、一方のロボット (robot-A) でワークをしっかりと把持し、もう一方のロボット (robot-B) は手先に工具を装着し、これを用いて作業を行う場合を考える。このような作業形態は次のような点でたいへん興味深い。

1. robot-A は単にワークを把持するだけでなく、作業の遂行に都合の良いように姿勢を変更することで

作業の遂行自体に貢献することが可能である。この点はリングの皮剥き作業と共通する。

2. 作業を遂行することのみを目的とするなら、把持物体の位置と姿勢は一般に任意となる。この自由度を 1 で述べたように用いることもできるが、ワークを移動させながら、同時にそのワークに対し加工などの作業を行うことで生産性を向上させることも考えられる。

そこで以下本論文ではこのような作業形態に関する協調動作経路計画問題を取り扱うことにする。

3. 協調動作の定式化

3.1 記号

ここでは 2 章で議論した B) の作業形態を検討する。協調動作の定義でも述べたように、2 台のロボットに着目して一般の複数台のロボットによる協調作業を検討するため、ここでの定式化においては 2 台のロボットによる両手先の相対変位が部分的に制限される場合の協調作業を考え、この場合の運動学的関係を導く。

robot-A は手先につけられたグリップで物体をしっかりと固定しており、robot-B の手先には作業を遂行するための工具が装着されているものとする。また 2 台のロボットはそれぞれ手先の任意の位置と姿勢が取り得るために必要十分な 6 自由度を持つものとし、基準座標系からみた各ロボットのベースの位置と姿勢は変化しないものとする。この 2 台のロボットで与えられた作業を協調的にこなす。作業は作業変数（物体座標系でみた作業曲線ベクトル） ${}^{obj}r_T$ で与えられるとする。

以下に本論文で用いる記号を以下のように定める

Fig. 2 Coordinate systems

(Fig. 2 参照).

 $\theta \in \mathbb{R}^6$: robot-A の関節変数 $q \in \mathbb{R}^6$: robot-B の関節変数 ${}^0r_A, {}^0r_B$: 基準座標系 (Σ_0) でみた robot-A, robot-B のベース座標系 (Σ_A, Σ_B) の原点の位置ベクトル ${}^A r_G(\theta), {}^B r_T(q)$: Σ_A, Σ_B でみたグリッパ座標系, ツール座標系 (Σ_G, Σ_T) の原点の位置ベクトル ${}^{obj}r_T, {}^{obj}r_G$: 物体座標系 (Σ_{obj}) でみた Σ_T と Σ_G の原点の位置ベクトル ${}^0r_{obj}$: Σ_0 でみた Σ_{obj} の原点の位置ベクトル ${}^0R_A, {}^0R_B$: Σ_A, Σ_B から Σ_0 への回転行列 ${}^A R_G(\theta), {}^B R_T(q)$: Σ_G, Σ_T から Σ_A, Σ_B への回転行列 ${}^{obj}R_G, {}^{obj}R_T$: Σ_G, Σ_T から Σ_{obj} への回転行列 ${}^0R_{obj}$: Σ_{obj} から Σ_0 への回転行列 ${}^0\omega_A, {}^0\omega_B$: Σ_0 でみた Σ_A, Σ_B の角速度ベクトル ${}^A\omega_G, {}^B\omega_T$: Σ_A, Σ_B でみた Σ_G, Σ_T の角速度ベクトル ${}^{obj}\omega_T$: Σ_{obj} でみた Σ_T の角速度ベクトル ${}^0\omega_{obj}$: Σ_0 でみた Σ_{obj} の角速度ベクトル

3.2 物体の位置、姿勢が任意の場合の運動学

ここでは作業対象物の位置と姿勢は特に与えられておらず、作業を遂行するための作業変数 ${}^{obj}\dot{r}_T, {}^{obj}\dot{\omega}_T$ のみ与えられている場合の協調作業の運動学を検討する。

Fig. 2 から明らかなように Σ_0 でみた Σ_T の原点の位置ベクトル 0r_T は

$${}^0r_T = {}^0r_A + {}^0R_A {}^A r_G(\theta) + {}^0R_A {}^A R_G(\theta) {}^G r_{obj}$$

$$+ {}^0R_A {}^A R_G(\theta) {}^G R_{obj} {}^{obj}r_T$$

$$= {}^0r_B + {}^0R_B {}^B r_T(q) \quad (1)$$

とかける。ただし ${}^G r_{obj}$ は Σ_G でみた Σ_{obj} の原点の位置ベクトル。 ${}^G R_{obj}$ は Σ_{obj} から Σ_G への回転行列である。回転行列の性質から

$${}^G r_{obj} = -{}^G R_{obj} {}^{obj}r_G = -{}^{obj}R_G {}^T {}^{obj}r_G \quad (2)$$

と表わすことができ、これを用いると ${}^{obj}r_T$ は

$$\begin{aligned} {}^{obj}r_T &= {}^{obj}R_G {}^A R_G^T(\theta) {}^0R_A^T ({}^0r_B - {}^0r_A + {}^0R_B f_r(q)) \\ &\quad - {}^{obj}R_G {}^A R_G^T(\theta) g_r(\theta) + {}^{obj}r_G \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ただし、

$$g_r(\theta) = {}^A r_G(\theta) \quad (4)$$

$$f_r(q) = {}^B r_T(q) \quad (5)$$

ここで各ロボットのベース座標系でみた手先位置、姿勢と各関節角との微分関係を表すヤコビ行列を

$${}^A \dot{r}_G(\theta) = J_{g_r}(\theta) \dot{\theta} \quad {}^A \omega_G = J_{\phi}(\theta) \dot{\theta} \quad (6)$$

$${}^B \dot{r}_T(q) = J_{f_r}(q) \dot{q} \quad {}^B \omega_T = J_{\psi}(q) \dot{q} \quad (7)$$

として、(3) 式の両辺を微分すると、

$$\begin{aligned} {}^{obj}\dot{r}_T &= -{}^{obj}R_G [{}^A \hat{R}_{BA}(\theta) {}^A R_G^T(\theta) \\ &\quad + {}^A \hat{R}_T(\theta, q) {}^A R_G^T(\theta) \\ &\quad - {}^A \hat{R}_G(\theta) {}^A R_G^T(\theta)] J_{g_r}(\theta) \dot{\theta} \\ &\quad - {}^{obj}R_G {}^A R_G^T(\theta) J_{\phi}(\theta) \dot{\theta} \\ &\quad + {}^{obj}R_G {}^A R_G^T(\theta) {}^0R_A^T {}^0R_B J_{f_r}(q) \dot{q} \end{aligned} \quad (8)$$

ここではベクトル積のための行列演算子 $\hat{A} = [\times a] (a = [a_1, a_2, a_3]^T)$ を

$$\hat{A} = [\times a] = \begin{bmatrix} 0 & a_3 & -a_2 \\ -a_3 & 0 & a_1 \\ a_2 & -a_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

とし、この表記法を用いて

$$\begin{aligned} {}^A \hat{R}_{BA}(\theta) &= [\times {}^A r_{BA}], \\ {}^A r_{BA} &= {}^A R_G^T(\theta) {}^0R_A^T ({}^0r_B - {}^0r_A) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} {}^A \hat{R}_T(\theta, q) &= [\times {}^A r_T], {}^A r_T \\ &= {}^A R_G^T(\theta) {}^0R_A^T {}^0R_B f_r(q) \end{aligned} \quad (11)$$

$${}^A \hat{R}_G(\theta) = [\times {}^A r_G], {}^A r_G = {}^A R_G^T(\theta) g_r(\theta) \quad (12)$$

とおいた。つぎに Σ_0 でみた Σ_T の角速度ベクトル

${}^0\omega_T$ は

$$\begin{aligned} {}^0\omega_T &= {}^0\omega_A + {}^0R_A {}^A \omega_G + {}^0R_A {}^A R_G(\theta) {}^G \omega_{obj} \\ &\quad + {}^0R_A {}^A R_G(\theta) {}^G R_{obj} {}^{obj}\omega_T \\ &= {}^0\omega_B + {}^0R_B {}^B \omega_T \end{aligned} \quad (13)$$

ただし、 ${}^G \omega_{obj}$ は Σ_G でみた Σ_{obj} の角速度ベクトルである。 ${}^G \omega_{obj} = 0, {}^0\omega_A = 0, {}^0\omega_B = 0$ と (9), (10) 式を用いて (13) 式を変形して ${}^{obj}\omega_T$ を求めると

$${}^{obj}\omega_T = {}^{obj}R_G {}^A R_G^T(\theta) [{}^0R_A^T {}^0R_B J_{f_r}(q) \dot{q} - J_{f_\psi}(\theta) \dot{\theta}] \quad (14)$$

となる。(8) 式と (14) 式をまとめると、

$$\begin{bmatrix} {}^{obj}\dot{r}_T \\ {}^{obj}\dot{\omega}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = J(\theta, q) \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad (15)$$

ここで

$$\begin{aligned} J_{11} = & {}^{obj}R_G [{}^A R_G^T(\theta) J_{gr}(\theta) \\ & + {}^A \hat{R}_{BA}(\theta) {}^A R_G^T(\theta) J_{g\phi}(\theta) \\ & + {}^A \hat{R}_T(\theta, q) {}^A R_G^T(\theta) J_{g\phi}(\theta) \\ & - {}^A \hat{R}_G(\theta) {}^A R_G^T(\theta) J_{g\phi}(\theta)] \quad (16) \end{aligned}$$

$$J_{12} = {}^{obj}R_G {}^A R_G^T(\theta) {}^0 R_A {}^0 R_B J_{fr}(q) \quad (17)$$

$$J_{21} = -{}^{obj}R_G {}^A R_G^T(\theta) J_{g\phi}(\theta) \quad (18)$$

$$J_{22} = {}^{obj}R_G {}^A R_G^T(\theta) {}^0 R_A {}^0 R_B J_{fr}(q) \quad (19)$$

である。(15)式における J_{ij} は作業変数 ${}^{obj}\dot{r}_T$, ${}^{obj}\omega_T$ と関節変数 $\theta, \dot{\theta}$ の関係を表すヤコビアンとなっている。

3.3 物体の位置が指定される場合の運動学

ここでは作業対象物の位置は与えられており、姿勢の自由度のみ存在する場合の協調作業における運動学を検討する。このような例は、適当な位置に物体を固定して作業する場合や、2章で考えたように物体を与えられた経路で移動させながら作業をおこなう場合が考えられる。

作業対象物の位置は ${}^0 r_{obj}$ として与えられるとする。

これは

$${}^0 r_{obj} = {}^0 r_A + {}^0 R_A {}^A r_G(\theta) + {}^0 R_A {}^A R_G(\theta) {}^G r_{obj} \quad (20)$$

と表すことができ、両辺を微分して(6),(7)式を用いると、

$${}^0 \dot{r}_{obj} = {}^0 R_A [J_{gr}(\theta) + {}^0 R_A {}^0 \hat{R}_{obj}(\theta) J_{g\phi}(\theta)] \dot{\theta} \quad (21)$$

ただし、

$${}^0 \hat{R}_{obj}(\theta) = [\times {}^A r_{obj}], {}^A r_{obj} = -{}^A R_G(\theta) {}^{obj}R_G^T {}^{obj}r_G \quad (22)$$

(15)式と(21)式から

$$\begin{bmatrix} {}^0 \dot{r}_{obj} \\ {}^{obj}\dot{r}_T \\ {}^{obj}\omega_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{J}_{obj} & 0 \\ J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = J_{obj}(\theta, q) \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad (23)$$

となる注2)。ここで、

$$\hat{J}_{obj} = {}^0 R_A [J_{gr}(\theta) + {}^0 R_A {}^0 \hat{R}_{obj}(\theta) J_{g\phi}(\theta)] \quad (24)$$

である。

4. 2台のロボットによる協調作業計画

ここでは3章で導かれた2台のロボットによる協調作業の運動学関係式から協調作業に望ましい作業経路計画をおこなう。

4.1 冗長自由度

物体の位置、姿勢が任意の場合では、(15)式を $[\dot{\theta}, \dot{q}]^T$ で解くと、

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = J^-(\theta, q) \begin{bmatrix} {}^{obj}\dot{r}_T \\ {}^{obj}\omega_T \end{bmatrix} + (I - J^-(\theta, q) J(\theta, q)) y \quad (25)$$

注2) (21)式をサブタスクとして後に示す(25)式の y に拘束条件として組み込む方法もある¹⁹⁾。

と表せる。また物体の姿勢は任意で位置は与えられる場合では、同様に(23)式より、

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = J^-(\theta, q) \begin{bmatrix} {}^0 \dot{r}_{obj} \\ {}^{obj}\dot{r}_T \\ {}^{obj}\omega_T \end{bmatrix} + (I - J^-(\theta, q) J_{obj}(\theta, q)) y_{obj} \quad (26)$$

と表せる。ここで $J^-(\theta, q)$, $J^-(\theta, q)$ はそれぞれ $J(\theta, q)$, $J_{obj}(\theta, q)$ の一般逆行列を表し、 $y \in \mathbb{R}^{12}$, $y_{obj} \in \mathbb{R}^{12}$ はともに任意ベクトルである。

(25), (26)式からも明らかのように2台のロボットにより Fig. 2 で示したような協調作業をおこなわせるときは、各ロボットは冗長自由度を持たないロボットであるにもかかわらず、作業を遂行する自由度をのぞいても自由度が残ることがわかる。

4.2 冗長自由度を利用しない作業計画

作業が ${}^{obj}\dot{r}_T$, ${}^{obj}\omega_T$ で与えられ、作業対象物の作業中の位置、姿勢が任意の場合の関節経路 $[\theta, q]^T$ を求める一つの方法として(25)式の $J^-(\theta, q)$ に擬逆行列 $J^+(\theta, q)$ を用い、 $y=0$ とする方法が考えられる。このとき、

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = J^+(\theta, q) \begin{bmatrix} {}^{obj}\dot{r}_T \\ {}^{obj}\omega_T \end{bmatrix} \quad (27)$$

ただし、

$$J^+(\theta, q) = J^T(\theta, q) (J(\theta, q) J^T(\theta, q))^{-1} \quad (28)$$

と表せる。これは与えられた作業を遂行しながら各関節角の変化が少なくなるような解を与えるはずである。このときの与えられた作業を遂行するための各関節の動作を求めるためのアルゴリズム (Algorithm-A) は次のようになる。

Algorithm-A

Step-1: 作業対象物に適当な初期位置・姿勢を与え、各ロボットの初期関節角度 θ_0, q_0 を求める。 $i=0$ とする。

Step-2: (27)式を

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta q \end{bmatrix} = J^+(\theta, q) \begin{bmatrix} \Delta^{obj}\dot{r}_T \\ \Delta^{obj}\dot{\phi}_T \end{bmatrix} \quad (29)$$

として、作業変数 $\Delta^{obj}\dot{r}_T$, $\Delta^{obj}\dot{\phi}_T$ ($\Delta^{obj}\dot{\phi}_T = {}^{obj}\dot{\omega}_T$) を(29)式に代入し、 $\Delta\theta, \Delta q$ を求める。 $\Delta^{obj}\dot{r}_T, \Delta^{obj}\dot{\phi}_T$ は与えられた作業変数 ${}^{obj}\dot{r}_T, {}^{obj}\dot{\omega}_T$ と適当な離散時間間隔 ΔT により求めることができる。ただし、作業姿勢が ${}^{obj}\dot{\omega}_T$ でなく物理的な意味が明確な、例えばオイラー角によって与えられるときは付録に示す方法により $\Delta^{obj}\dot{\phi}_T$ に変換すればよい。

Step-3: $i+1$ 番目の作業での関節角を次のように求め、 $i=i+1$ として **Step-2** にもどり、これらの手順を繰り返す。

$$\begin{cases} \theta_{i+1} = \theta_i + \Delta\theta \\ q_{i+1} = q_i + \Delta q \end{cases} \quad (30)$$

作業対象物の作業中の位置が指定される場合も同様に求められる。

4.3 冗長自由度を利用する作業計画

次に(25)式の任意ベクトル y , または(26)式の y_{obj} を利用してより望ましい協調動作をおこなうことを考える。そこで関節角で表された望ましい動作をおこなうための評価関数 V を

$$V = V(\xi), \quad \xi = \begin{bmatrix} \theta \\ q \end{bmatrix} \quad (31)$$

とすれば任意ベクトル y は

$$y = k \frac{\partial V(\xi)}{\partial \xi} \quad (32)$$

(k は適当な正定数)

とすればよい¹⁹⁾。robot-A と robot-B で別の評価関数を与えたいときは

$$y = \begin{bmatrix} k_A \frac{\partial V_A(\theta)}{\partial \theta} \\ k_B \frac{\partial V_B(q)}{\partial q} \end{bmatrix} \quad (33)$$

(k_A, k_B は適当な正定数)

のようになる。評価関数として具体的には可操作度、操作力度(可操作度の逆数)、動的可操作度、条件数、障害物回避を組み込んだものなど²⁰⁾が考えられるが、これは経路計画を行うときに与えられた作業に対する固有の重要性を考慮して決めることになる。

冗長自由度を利用することによってより望ましい協調動作を行う関節経路を計画するアルゴリズム(Algorithm-B)は次のようになる。

Algorithm-B

(Stage-1: 作業対象物の作業位置、姿勢の決定)

Step-1: 作業対象物に適当な初期位置・姿勢を与え、初期関節角度 θ_0, q_0 を求める。 $i=0$ とする。

Step-2: (25) 式を

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta q \end{bmatrix} &= J^{-1}(\theta, q) \begin{bmatrix} \Delta^{obj} r_T \\ \Delta^{obj} \phi_T \end{bmatrix} \\ &+ (I - J^{-1}(\theta, q) J(\theta, q)) y \end{aligned} \quad (34)$$

として、 y に(32)式のように評価を考慮したものを代入する。(34)式で作業変数の増分を $\Delta^{obj} r_T = 0, \Delta^{obj} \phi_T = 0$ として $\Delta\theta, \Delta q$ をもとめる。このとき与えられた作業は遂行されず、評価を考慮した望ましい関節角の増分が得られる。

Step-3: Step-2 で得られた $\Delta\theta, \Delta q$ により θ_i, q_i を次のように置き換える。

$$\begin{cases} \theta_i \leftarrow \theta_i + \Delta\theta \\ q_i \leftarrow q_i + \Delta q \end{cases} \quad (35)$$

これを Step-1 から Step-3 までを評価が十分大きくなるまで繰り返す。

(Stage-2: 作業の遂行に必要な関節角動作の計画)

Step-4: 与えられた作業変数 $\Delta^{obj} r_T, \Delta^{obj} \phi_T$ と評価を考慮して決定した y を(34)式に代入し、 $\Delta\theta, \Delta q$ を求める。

Step-5: $i+1$ 番目の繰り返し計算における関節角度を次のようにする。

$$\begin{cases} \theta_{i+1} = \theta_i + \Delta\theta \\ q_{i+1} = q_i + \Delta q \end{cases} \quad (36)$$

Step-6: $i=i+1$ として Step-2 にもどり、これらの手順を繰り返す。

Algorithm-A との違いは、作業の遂行動作の各ステップごとに評価を考慮して位置と姿勢の最適化をおこなっている点である。

作業対象物の作業中の位置が指定される場合も同様に求められる。

5. 協調作業計画の例題

ここでは4章で提案された協調作業計画法を2台の3リンク平面運動ロボットの例題に適用する。Fig. 3 に示すように左側の robot-A の手先に付けられたグリッパで楕円形をした物体をしっかりとつかみ、右側の robot-B の手先に付けられた工具で加工をおこなう。作業は Fig. 4 に示すように工具を楕円の周上で接線方向に対して 90 度に保ちながら沿わせることで遂行されるもの

Fig. 3 Numerical example for planning a coordinated work

Fig. 4 Specified work

とする。

各リンクの諸元は、Table 2 に示す。\$l_i\$、\$m_i\$、\$I_i\$ はそれぞれリンクの長さ、質量、慣性モーメントを表わすこととし、添え字 \$i\$ はそれぞれのロボットの第 \$i\$ リンクを表わす。

5.1 作業位置、姿勢が任意の場合の例題

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 8 は適当な物体の初期位置、姿勢 \$(x, y, \alpha) = (0.0(\text{m}), 0.2(\text{m}), 0.0(\text{deg}))\$ から (25) 式あるいは (27) 式に従って作業を計画した例である。

Fig. 5 は、一般逆行列として擬似逆行列を用い、Algorithm-A で得られた経路を示しており、関節角変化ができるだけ少ないようにして作業を遂行している様子が

Table 2 Specifications of robot-A and robot-B

	i	\$l_i(\text{m})\$	\$m_i(\text{kg})\$	\$I_i(\text{kgm}^2)\$
A	1	1.00	10.00	3.330
	2	0.85	8.50	2.040
	3	0.70	4.00	1.300
B	1	1.00	2.50	0.8333
	2	0.85	2.12	0.5088
	3	0.10	0.25	0.0008

Fig. 5 Coordinated motion to execute the specified work which is obtained by Algorithm-A

Fig. 6 Optimal coordinated motion to execute the specified work which is obtained by Algorithm-B (Manipulability)

わかる。また、Fig. 6, Fig. 8 は評価にそれぞれ (37) 式、(38) 式で表される可操作度、動的可操作度を用い、Algorithm-B で得られた経路をそれぞれ示している。

$$\begin{cases} V_A(\theta) = \sqrt{\det(J_{gr}(\theta)J_{gr}^T(\theta))} \\ V_B(q) = \sqrt{\det(J_{fr}(q)J_{fr}^T(q))} \end{cases} \quad (37)$$

(for Fig. 6)

$$\begin{cases} V_A(\theta) = \sqrt{\det(J_{gr}(\theta)(M_{gr}^T(\theta)M_{gr}(\theta))^{-1}J_{gr}^T(\theta))} \\ V_B(q) = \sqrt{\det(J_{fr}(q)(M_{fr}^T(q)M_{fr}(q))^{-1}J_{fr}^T(q))} \end{cases} \quad (38)$$

(for Fig. 8)

ここで、\$M_{gr}(\theta)\$、\$M_{fr}(q)\$ はともに robot-A, robot-B の慣性マトリクスを表している。

Fig. 7, Fig. 9 は、それぞれ Fig. 6, Fig. 8 に対応する評価値（可操作度、動的可操作度）を縦軸にとり、移動経路（step）を横軸にとっている。ただし、初期位置、姿勢から 2 番目のセンターシンボルまでは、Algorithm-B の Stage-1 での初期位置、姿勢の最適化の様子を示している。Fig. 6, Fig. 8 についても 1 番目と 2 番目のセンターシンボルの間は初期位置、姿勢の最適化の様子を示しており、この間作業は遂行しない。また比較のために、擬似逆行列で作業計画をした場合の Fig. 5

Fig. 7 Index values for the paths of Fig. 5 and Fig. 6

Fig. 8 Optimal coordinated motion to execute the specified work which is obtained by Algorithm-B (Dynamic manipulability)

Fig. 9 Index values for the paths of Fig. 5 and Fig. 8

Fig. 10 Coordinated motion to execute the specified work and to stay at the specified point which is obtained by Algorithm-A

Fig. 11 Coordinated motion to execute the specified work and to follow the specified path of object which is obtained by Algorithm-B (Dynamic manipulability)

に対応する評価値も同時に示している。これらの図から Algorithm-B を用いて冗長自由度を利用した場合の経路は高い評価を維持しつつ作業が遂行できること、さらにこれは作業開始前の初期姿勢の最適化にかなりの比重

Fig. 12 Coordinated motion to execute the specified work and to stay at the specified point which is obtained by Algorithm-B (Manipulability)

Fig. 13 Index values for the paths of Fig. 10 and Fig. 12

があることもわかる。

5.2 作業対象物の位置が指定される場合の例題

Fig. 10, Fig. 12 は物体位置を $(x_{obj}, y_{obj}) = (0.0(m), 0.6(m))$ に固定して作業をおこなう場合に、また、Fig. 11 は直線経路 (始端: $(-0.3(m), 0.4(m)) \rightarrow$ 終端: $(0.3(m), 0.6(m))$) にそって物体の重心を移動させながら作業をおこなう場合に対して協調作業関節経路を計画した例である。

このうち Fig. 10 は、一般逆行列として擬似逆行列を用い Algorithm-A により計画した経路を示している。また、Fig. 11, Fig. 12 は評価にそれぞれ動的の可操作度、可操作度を用い Algorithm-B により計画した経路を示している。Fig. 13 は、Fig. 12 に対応する評価値 (可操作度) を縦軸にとり、移動経路 (step) を横軸にとっている。また比較のために、擬似逆行列で作業計画をした場合の Fig. 10 に対応する評価値も同時に示している。これらの図から作業対象物の位置が指定される場合においても、Algorithm-B を用いて冗長自由度を利用した場合の方が作業位置、姿勢が任意の場合と同様に評価は全体的に良くなることわかる。

6. ま と め

本研究では、与えられた作業を実現するための複数台ロボットによる協調的な作業形態を検討し、協調作業のための経路計画アルゴリズムを提案した。以下、得られた結果を示す。

1) 協調作業を行う2台のロボットの両手先位置、姿勢の運動学的な拘束条件による分類から、従来あまり検討されていない作業形態を指摘した。

2) 2台のロボットを用いた興味深い協調作業形態の例として、片方のロボットでワークを把持し、もう一方のロボットで与えられた作業を行う協調動作を検討し、この作業に対する運動学の定式化を行った。

3) 協調作業の運動学式に基づき、協調動作特有の冗長自由度を利用した経路計画アルゴリズムを提案した。また2台の3リンクロボットの協調作業経路計画問題に提案した方法を適用し、アルゴリズムの有効性を確認した。

なお、本研究で提案している経路計画アルゴリズムは基本的には各時点における瞬時最適化となっており、得られた関節軌道が動力学的になめらかになる保証はない。今後の課題として動力学的を十分考慮した協調動作軌道計画問題が残されている。

付録 作業変数がオイラー角で与えられる場合

作業変数がオイラー角 $\phi^T = [\alpha, \beta, \gamma]$ の増分 $\Delta\phi$ で与えられる場合は

$$\Delta^{obj}\phi_T = \begin{bmatrix} 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \sin\beta \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \sin\beta \\ 1 & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \Delta\phi$$

を用いて $\Delta^{obj}\phi_T$ に変換すればよい¹⁹⁾。

参 考 文 献

- 1) 野武 憲, 石見勝弘, 真鍋隆夫, “冗長性を利用したロボットの協調制御の一手法”, 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 659-660, 1989.
- 2) 長尾陽一, 太田英明, 尾上彦, 中村尚範, “ハンドリングアーク溶接ロボットの開発”, 第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 313-316, 1990.
- 3) 中村仁彦, 永井 清, 吉川恒夫, “複数のロボット機構による協調的あやつり力学”, 日本ロボット学会誌, Vol. 4, No. 5, pp. 489-498, 1986.
- 4) F. Cheng and D. E. Orin, “Efficient Algorithm for Optimal Force Distribution-The Compact-Dual LP Method”, IEEE Trans. RA, Vol. 6-2, pp. 178-187, 1990.
- 5) C. R. Carignan and D. L. Akin, “Optimal Force Distribution for Payload Positioning Using a Planar Dual-Arm Robot”, ASME J. Dyn. Syst., Meas., and Contr., Vol. 111, pp. 205-210, 1989.
- 6) 隈下恭介, 杉江俊治, 小野敏郎, “2次元平面内における2本のマニピュレータの協調的操り一定式化と制御形的设计”, 日本ロボット学会誌, Vol. 7, No. 2, pp. 145-153, 1989.
- 7) 内山 勝, ビエール・ドジェ, “両手ロボットの対称型運動学と非マスタースレーブ協調制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 7, No. 1, pp. 19-30, 1989.
- 8) A. M. Dudar and A. H. Eltimahy, “A Near-Minimum Time Controller for Two Coordinating Robots Grasping an Object”, Proc. of 1990 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1184-1189, 1990.
- 9) S. B. Moon and S. Ahmad, “Time Scaling of Trajectories for Cooperative Multi-Robot Systems”, Proc. of the 29th Conf. on Decision and Control, pp. 1120-1127, 1990.
- 10) J. E. Bobrow, J. M. McCarthy V. K. Chu, “Minimum-Time Trajectories for Two robots Holding the Same Workpiece”, Proc. of the 29th Conf. on Decision and Control, pp. 3102-3107, 1990.
- 11) P. Dauchez and R. Zapata, “Co-ordinated Control of Two Cooperative Manipulators: The Use of a Kinematic Model”, 15th ISIR pp. 641-648, 1985.
- 12) V. Kumar and J. F. Gardner, “Kinematics of Redundantly Actuated Closed Chains”, IEEE Trans. RA, Vol. 6-2, pp. 269-274, 1990.
- 13) S. Lee, “Dual Redundant Arm configuration Optimization with Task-Oriented Dual Arm Manipulability”, IEEE Trans. RA, Vol. 5-1, pp. 78-97, 1989.
- 14) P. Chiacchio, S. Chiaverini, L. Sciacivco and B. Siciliano, “Global Task Space Manipulability Ellipsoids for Multiple-Arm Systems”, IEEE Trans. RA, Vol. 7-5, pp. 678-685, 1991.
- 15) M. K. Jouaneh, Z. Wang and D. A. Dornfeld, “Trajectory Planning for Coordinated Motion of a Robot and Positioning Table: Part 1-Path Specification-”, IEEE Trans. RA, Vol. 6-6, pp. 735-745, 1990.
- 16) M. K. Jouaneh, D. A. Dornfeld and M. Tomizuka, “Trajectory Planning for Coordinated Motion of a Robot and Positioning Table: Part 2-Optimal Trajectory Specification-”, IEEE Trans. RA, Vol. 6-6, pp. 746-759, 1990.
- 17) W. F. Carriker, P. K. Khosla and B. H. Krogh, “Path Planning for Mobile Manipulators for Multiple Task Execution”, IEEE Trans. RA, Vol. 7-3, pp. 403-408, 1991.
- 18) Y. Nakamura, H. Hanafusa and T. Yoshikawa, “Task-Priority Based Redundancy Control of Robot Manipulators”, The Int. J. of Robotics Research, Vol. 6-2, pp. 3-15, 1987.
- 19) 吉川恒夫, “ロボット制御基礎論”, コロナ社, pp. 109-131, 1988.
- 20) C. A. Klein and B. E. Blaho, “Dexterity Measures for the Design and Control of Kinematically Redundant Manipulators”, The Int. J. of Robotics Research, Vol. 6-2, pp. 72-83, 1987.

山本元司
(Motoji YAMAMOTO)

1962 年 7 月 10 日生。1985 年九州大学工学部動力機械工学科卒業。1990 年同大学院工学研究科博士課程修了（生産機械工学専攻）。同年、九州大学工学部講師。1992 年同助教授、現在に至る。ロボット工学の研究に従事。工学博士。
(日本ロボット学会正会員)

毛利 彰 (Akira MOHRI)

1941 年 6 月 23 日生。1964 年九州大学工学部生産機械工学科卒業。1969 年同大学院工学研究科博士課程単位取得退学（生産機械工学専攻）。同年、九州大学工学部講師。助教授を経て、1982 年同教授、現在に至る。ロボット工学、制御工学の研究に従事。工学博士。
(日本ロボット学会正会員)

黒田創明 (Soumei KURODA)

1967 年 10 月 23 日生。1992 年九州大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、(株)京セラ入社。