2 移動体の協調性の運動学的解析

安井 裕司* 原文 雄* 有竹 俊之*

A Kinematic Analysis of Cooperation for Two Mobile Robots along a Wavy Road

Yuji Yasui*, Fumio Hara* and Toshiyuki Aritake*

This paper deals with a kinematics analysis of cooperation necessary for two mobile robots to carry a long bar along a sinusoidal wavy road. The robots are assumed to be driven by crawler mechanism and to have a single link arm which moves only prismatically. For the task to carry a long bar with keeping its height constant and its attitude horizontal, we analyse the kinematic conditions necessary for the two mobile robots to perform the given task and find that there exist two kinds of cooperation mode; one is to change the direction of proceeding and the other is to change the robot role from "master" to "servant" and vis-versa. The kinematic condition for these two cooperation mode are derived and confirmed by simulation study.

Key Words: Kinematic, Cooperation, Mobile Robot, Master, Servant

1. はじめに

人間が近づけない極限環境で人間に代わって様々な作業を行う、極限作業ロボットの研究が数多く行われているなかで、注目を集めているのが複数台のロボット間における協調タスク処理である。この複数台のロボットの協調を考える場合、二通りのアプローチが考えられる。ひとつは、高性能、高出力のロボットをいかに協調させるかというアプローチ[1]であり、もう一方は必要最小限のシンプルな機能のロボットを複数台協調させることにより、ロボット群として、より高度なタスクを行わせるというアプローチ[2]である。

そこで、本研究では、後者の協調のアプローチに従い、簡単な機構を持った縦列する2台の移動ロボットによる長尺物の運搬における協調を取り扱う。平面上を移動する2台のロボットによる運搬に関してはすでに報告がなされている[1]~[4]ので、本研究では、より一般的な凹凸路面上における運搬を想定し、ロボットは機構学的に必要な最小限の伸縮方向の1自由度のアームと駆動装置のみを持っているとする。このようなロボット2台が縦列して長尺物を運搬する場合を対象として、その運動を幾何学的にモデル化し、その運動学的協調性を解析する。

2. ロボットのモデル化

凹凸路面上を移動する2台のロボットによる長尺物の運搬を

原稿受付 1993年6月3日

*東京理科大学工学部

*Science Univ. of Tokyo

幾何学的にモデル化する(Fig. 1). 絶対座標系の横軸を X 軸、縦軸を Y 軸とすると、凹凸路面の座標 (x, y) は

$$y = A \sin \omega x \quad (1)$$

$$(\omega = 2\pi/L)$$

と表される。ここで、 A は路面の振幅、 L は路面の波長である。2台のロボットと長尺物を Fig. 1 に示すような三つのリンク(A, B, C)にモデル化する。ロボットの運動条件は
移動：凹凸路面上の1次元移動のみで前後進可能
アーム：伸縮方向の1自由度の直動で伸縮自由
とする。長尺物(以後、棒と略す)の幾何学的条件は、

- ・支持高さ一定
- ・支持幅一定
- ・傾きゼロ

である。このことより、リンクA, Cはロボットに、リンクBは棒に対応するので、それぞれのリンクの運動学的拘束条件は、

リンクA, C : 路面の接線に垂直
長さ自由

Fig. 1 Kinematics model of robots

リンク B : 高さ一定 (D)
 長さ一定 (BL)
 傾きゼロ

となる。リンクの関節に Fig. 1 のように番号 $i(i=1\sim4)$ を付け、各関節の座標を (x_i, y_i) とし、 x_1, x_4 における路面の傾きを θ, ψ とする。このとき、関節 1, 2, 3 の座標は、リンク A の長さを h_1 とすると、

$$\begin{cases} x_1 = x_1 \\ y_1 = A \sin \omega x_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_2 = x_1 - h_1 \sin \theta \\ y_2 = y_1 + h_1 \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_3 = x_2 + BL \\ y_3 = D \end{cases} \quad (4)$$

となる。次に、棒の拘束条件のため関節 3 から関節 4 は、関節 1 から関節 2 を求めたようには求められない。よって、関節 3 と関節 4 の関係を、Fig. 2 に示すような相交わる二つのベクトルの関係に置き換える。ベクトル H_2 と X_4 はそれぞれ、

$$\begin{aligned} H_2 &= (x_4 - x_3, y_4 - y_3) \\ X_4 &= (1, A \cos \omega x_4) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。リンク A, C の運動学的拘束条件により、ベクトル H_2 と X_4 は直交するので、

$$-x_3 + x_4 + \frac{1}{2} A^2 \omega \sin(2\omega x_4) - AD \omega \cos \omega x_4 = 0 \quad (6)$$

となる。式(6)は関節 4 の x 座標 x_4 の導出式で、 y_4 は式(7)により求めることができる。

$$y_4 = A \sin \omega x_4 \quad (7)$$

さて、式(6)における変数は x_3 と x_4 であるので、 x_3 が変化したときの検討をする。 x_3 は 1 項目の “ $-x_3$ ” のみに現れる。よって、 x_3 の増減は式(6)の 2 項目から 4 項目によって決まる曲線(以後、解曲線と呼ぶ)の上下方向への移動を意味する。 x_3 の増加は、Fig. 1 の関節 3、すなわち支持している棒の右端の X 正方向への移動に対応する。

Fig. 2 Vector representation of link-configuration

Fig. 3 Solution curves to determine the robot position

Fig. 3 に、 x_3 を変化させたときの式(6)の左辺の表す曲線の変化を示す。Fig. 3 における解曲線と X 軸に交点が式(7)を満たす x_4 である。Fig. 3 より、棒の支持点 x_3 がどこへ移動していても、その x_3 に対する解 x_4 は必ず存在することが確認できる。よって、棒の支持点座標 x_3 が与えられたとき、凹凸路面上には、その支持点にアームを伸ばすことのできるようなロボットの位置 x_4 が必ずひとつ以上は存在する。

3. 解曲線の諸特性

3.1 凹凸路面の焦点高さ

Fig. 4 のような正弦曲線の凹凸路面上の点 $R(x, A \sin \omega x)$ における曲率半径の中心 P (以後、焦点と呼ぶ)の座標 (x_p, y_p) を求める。点 R における曲率半径 ρ は

$$\rho = \frac{1}{\kappa} = \frac{(1 + \omega^2 A^2 \cos^2 \omega x)^{3/2}}{\omega^2 A \sin \omega x} \quad (8)$$

となり、点 R での傾き θ は

$$\theta = \tan^{-1}(\omega A \cos \omega x) \quad (9)$$

よって、焦点 P は

$$\begin{aligned} (x_p, y_p) &= (x + \rho \sin \theta, A \sin \omega x - \rho \cos \theta) \quad \left(0 \leq x \leq \frac{L}{2}\right) \\ &= (x - \rho \sin \theta, A \sin \omega x + \rho \cos \theta) \quad \left(\frac{L}{2} < x \leq L\right) \end{aligned} \quad (10)$$

となる。

焦点の y 座標 y_p を焦点高さ H_p と呼ぶと、 H_p は、

$$\begin{aligned} H_p &= A \sin \omega x \\ &\quad - \frac{(1 + \omega^2 A^2 \cos^2 \omega x)^{3/2}}{\omega^2 A \sin \omega x} \cos(\theta) \\ &\quad \left(\because \omega = \frac{2\pi}{L}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

となり、焦点高さ H_p の x に対する軌跡は Fig. 5 のようになる。Fig. 5 より、焦点高さ H_p が極小 S になるのは $X=3L/4$

Fig. 4 Center of curvature

Fig. 5 Locus of H_p

のとき、

$$S = -A + \frac{1}{\omega^2 A} \quad (12)$$

となる。

3.2 棒の支持高さと焦点高さに関する諸特性

棒の支持高さ D と焦点高さの極小点 S の変化に関しての解曲線の諸特性について検討する。 D と S の関係が、 $D < S$, $D = S$, $D > S$ となるときの解曲線を、それぞれ、Fig. 6(a), (b), (c) に示す。

$D < S$ のとき、つまり、焦点軌跡の極小点 S が棒の支持高さ D より上にあるとき、解曲線は Fig. 6(a) のように傾きが常に正となり、ある x_3 に対して、 x_4 はひとつだけ求まる。 $D = S$ のとき、Fig. 6(b) のように、解曲線は傾きがゼロの変曲点を持つ。 $D > S$ のとき、Fig. 6(c) のように、極大値と極小値を持つ、つまり、傾きが負になる x_4 の箇所を持つ。 このため、棒の支持位置 x_3 を動かしていくと、Fig. 6(c) のように複数の解を持つようになる。

以上より、焦点軌跡の極小点 S と棒の支持高さ D との関係により解曲線の特性は変化する。

3.3 幾何学的条件の無次元化

解曲線に傾きが負になる箇所が現れる条件、つまり、 $D > S$

Fig. 6 Solution curves to determine the robot position

Fig. 7 Area which indicates the cooperation in direction change

Fig. 8 Relationship between the direction of robot movement and the direction of arm tip movement

となる幾何学的条件を無次元化する。式(12)より、

$$D > S = \frac{L^2}{4\pi^2 A} - A \quad (13)$$

であるので、無次元支持高さ $\delta (=D/A)$ と無次元振幅 $\zeta (=A/L)$ の二つの無次元パラメータを用いて変形すると、

$$D/A > \frac{1}{4\pi^2 \zeta^2} - 1 \quad (14)$$

を得る。この式(14)が $D > S$ となる無次元支持高さ δ と無次元振幅 ζ の条件である。この条件を満たすのは Fig. 7 の斜線 (■) の領域である。

ここで、Fig. 6(a), (b), (c) の解曲線と Fig. 7 のマップとの関連について述べる。Fig. 7 における斜線の領域 (■) は $D > S$ の領域であるので、解曲線は極大点と極小点を持つ Fig. 6(c) のような解曲線を持つ。Fig. 7(b) の斜線外の領域 (□) は $D < S$ の領域であるので、解曲線は Fig. 6(a) のような単調増加の曲線になる。また、Fig. 7 の■と□の境界の曲線上では $D = S$ であるので、Fig. 6(b) のような変曲点を持つ解曲線となる。なお、 $\delta < 1$ の領域は、路面の最高点より棒の支持高さが低くなるので、実際にはありえない条件となる。

3.4 ロボットの移動方向とアーム先端の移動方向の反転

Fig. 7 を基にして、路面の焦点の位置と棒の支持高さ D との関係から、次のような検討ができる。Fig. 8 の H_{P1} のように H_P が路面 $y(x)$ よりも下に位置するとき、ロボットが R_{11} から R_{12} へ移動すると、アーム先端は A_{11} から A_{12} へ移動する。Fig. 8 の H_{P2} のように H_P が棒の支持高さ D よりも上に位置するとき、ロボットが R_{21} から R_{22} へ移動すると、アーム先端は A_{21} から A_{22} へ移動する。Fig. 8 の H_{P3} のように H_P が路面と棒の支持高さの間に位置するとき、ロボットが R_{31} から R_{32} へ移動すると、アーム先端はロボットの移動方向とは反対に A_{31} から A_{32} へ移動する。

以上をまとめると、焦点の位置が棒の支持高さ と路面との間に位置するときには、ロボットの移動方向とアームの先端の移動方向が反転する。解曲線に対応させると、解曲線の傾きが負になっている x_4 の箇所は焦点高さ H_P が棒の支持高さ と路面との間に位置している。解曲線の傾きが負になる x_4 の箇所を持つ条件は $D > S$ であるので、Fig. 7 の■の領域の条件においてのみ、ロボットの移動方向とアームの先端の移動方向の反転が起こる。

4. 協調の必要性

4.1 前後進切り替えによる協調の必要性

2章では、棒の支持位置 x_3 の進行方向への移動を解曲線の y 軸 ($H_2 \cdot X_4$) に対しての下へ移動として解釈した。ここでは、この関係を Fig. 9(a), (b) のような固定された解曲線があり、これに対して、棒の支持位置 x_3 の進行方向への移動を ($H_2 \cdot X_4$) の直線の上昇と解釈し、その交点を解 x_4 と見る。

棒の支持位置 x_3 を進行方向へ動かしたとき、Fig. 9(a) のように解曲線に極小点、極大点が存在しない場合、 x_3 がロボットの進行方向へ移動すると、解 x_4 は $x_{41} \rightarrow x_{45}$ へと連続的に変化していく。これに対して、Fig. 9(b) のように解曲線に極小点、極大点が存在する場合、 x_3 がロボットの進行方向へ移動

Fig. 9 Continuous movement (a) and intermittent movement (b)

Fig. 10 Necessity of cooperation

していくと、解 x_4 は $x_{41} \rightarrow x_{42} \rightarrow x_{43}$ と連続的に移動していく。しかし、解 x_4 が解曲線の極大点にくる (x_{44}) と、次の瞬間には x_{45} へ不連続的に移動をする。つまり、ロボットが実際に移動できない点へ移動することになる。よって、実際のロボットではタスクを達成できないことになる。この不連続移動の原因は、 x_3 の移動を常に進行方向に対して前進としたことにある。このことを Fig. 10 を参考にして詳しく検討する。この条件のとき、解 x_4 は x_{44} から x_{45} へ不連続的な移動をする。これに対し、解曲線の傾きが負になる x_4 の箇所では、3.4 節で述べたようにロボットの移動方向とアームの先端の移動方向の反転が起きるので、 x_3 を進行方向とは反対に後進させる。そして、再び解曲線の傾きが正になる x_4 の箇所になったならば、 x_3 を進行方向と同方向に前進させる。こうすることにより、解 x_4 は x_{44} から x_{45} へ解曲線に沿った連続的な移動をする (Fig. 10)。

x_3 の位置は式 (4) より、相手のロボットの位置により決定されるので、 x_3 を後進させるということは、相手のロボットに今までの進行方向とは反対に移動してもらうことになる。これが「前後進切り替えによる協調」である。

これまでの述べてきた解曲線は

$$F_F \equiv -x_3 + x_4 + \frac{1}{2} A_2 \omega \sin(2\omega x_4) - AD\omega \cos \omega x_4 \quad (15)$$

であるが、これは棒の先端座標 (x_3, D) に対して、先行するロボットの路面上での位置 x_4 を導出する式である。ここで、棒の先端の座標 (x_3, D) を棒の後端座標 (x_2, D) に、先行のロボットの位置 x_4 を後行のロボットの位置 x_1 に置き換えると、

Fig. 11 Solution curves F_F, F_R

$$F_R \equiv -x_2 + x_1 + \frac{1}{2} A^2 \omega \sin(2\omega x_1) - AD\omega \cos \omega x_1 \quad (16)$$

を得る。式 (16) は棒の後端座標 (x_2, D) に対する路面上の後行のロボットの位置 x_1 を導出する式となる。棒の先端座標と後端座標は式 (4) の関係があるので、式 (16) は、

$$F_R \equiv -(x_3 - BL) + x_1 + \frac{1}{2} A^2 \omega \sin(2\omega x_1) - AD\omega \cos \omega x_1 = F_F + BL \quad (17)$$

となり、式 (15) を上方へ BL だけ平行移動した式になっていることがわかる。よって、棒の代表座標を (x_3, D) とすると、ある x_3 が与えられた場合、その位置の棒に対するロボットの凹凸路面上での位置 x_1, x_4 は

$$F_F = 0 \quad (18)$$

$$F_R = 0 \quad (19)$$

を満たす x_1, x_4 となる。つまり、式 (18), (19) は棒の位置がある位置に指定されたときの x_1, x_4 を導出する解曲線となる。Fig. 11 に F_F, F_R の解曲線を示した。Fig. 11 においては直線 T と二つの解曲線との交点の x 座標がそれぞれのロボットの x 座標ということになる。また、棒の x 方向への移動は、固定された解曲線に対しての直線 T の上方への移動に対応する。

ここで、二つの解曲線に Fig. 6(a), (b) のように極大点、極小点が存在しない場合は、前後進切り替えによる協調は必要がなく、二つのロボットは前進のみを行えばよい。一方、二つの解曲線に Fig. 6(c) のように極大値、極小値が存在する場合には、Fig. 9 に示す解曲線に対し、直線 T を T_1 から T_6 へ移動すると、二つのロボットは Table 1 に示したように前後進を切り替える必要がある。Table 1 のようにロボットを移動するためには、以下のように移動方向を決定すればよい。各ロボットの各位置における焦点高さ H_F が路面と棒の支持高さ D との間にきたときに前後進の切り替えが必要となる。よって、先行のロボットと後行のロボットが自分の位置の焦点高さ H_F が路面と棒の支持高さ D との間にあるかどうかを他方に送信し、他方から送られてきた H_F の情報と自分の H_F の情報から Table 2 に基づいて移動方向を決定する。Table 2 において、焦点高さ H_F が路面と棒の支持高さ D との間にあるときが $\bigcirc$ 、それ以外を $\times$ とする。

また、前後進を切り替える必要があるのは、解曲線に極大点、極小点が存在するときなので、3.3 節より「前後進の切り替えによる協調」が必要な条件は Fig. 7 における斜線の領域

Table 1 Direction change of robots

	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6
Front robot	F	F	F	B	F	
Rear robot	F	B	F	F	F	

F : move forward
B : move backward

Table 2 Direction change rule

Other	○	×
Self		
○	Forward	Forward
×	Backward	Forward

Fig. 12 Master and servant's movement where P_2 is close to D

(圖)となる。

4.2 移動方向、移動量決定優先の互譲による協調

2台のロボットは凹凸路面上を走行しているため、路面上のロボットの移動量とアームの先端の移動量は等しくない。ところが、棒の支持幅は一定と仮定している。このため、2台のロボットはアームの先端の移動量が等しくなるように、凹凸路面上を移動しなくてはならない。これを行うためには、まず、どちらかのロボットが移動方向と移動量を決定し、もう一方のロボットは、自分のアーム先端の移動方向と移動量が相手のそれと等しくなるように移動方向と移動量を決定する必要がある。このことより、どちらかのロボットに移動方向と移動量の決定優先を与えなくてはならない。このとき、先に移動方向と移動量を決定するロボットをマスターと呼び、マスターに合わせて移動方向と移動量を決定するロボットをサーバントと呼ぶことにする。

次に、マスターとサーバントをいかに決定するかということが問題になる。仮にマスターを一方のロボットに固定してしまったとすると、「2台のロボットの相互協調」ではなく、単なる「追従」ということになってしまう。

さらに、次のような問題が生じる。Fig. 12に示すように、マスターの焦点の位置 P_1 が棒の支持高さ D から十分に離れており、サーバントの焦点の位置 P_2 が棒の支持高さ D に近い場合を考える。

Fig. 13 Relationship between H_P and L_A

ロボットの移動量 L_R とアームの先端の移動量 L_A の割合は、棒の支持高さ D と路面に対しての焦点高さ H_P の相対位置により変化する。ここで、 $L_R=1$ としたときの各 H_P に対する L_A を表す略図を Fig. 13 に示す。Fig. 13 における L_A は、焦点高さ H_P が無限大のときは、 $L_R=L_A=1$ となり、棒の支持高さ D へ向かうにつれて減少し、 D と H_P が一致すると $L_A=0$ となる。そして、路面に近くなるにつれ L_A は再び無限大へと増加する。さらに、 H_P が路面の下方へ離れていくと、 L_A は無限大から 1 へと減少することがわかる。

Fig. 12 の場合、マスターの焦点位置 P_1 は棒の支持高さ D から十分離れているので、ロボットの移動量 L_R とアームの先端移動量 L_A の大きさにそれほど差は生じない。これに対して、マスターのアーム先端が R_2 から R_2' へ移動したことにより、サーバントはアーム先端を F_2 から F_2' へ移動しなくてはならない。ところが、サーバントの焦点位置 P_2 は棒の支持高さ D に近い位置にあるため、Fig. 13 より、ロボットの移動量 L_R に比べて、アーム先端の移動量 L_A は非常に小さくなる。これにより、サーバントはアーム先端を F_2 から F_2' へ移動するために、 F_1 から F_1' へ移動しなくてはならない。このとき、サーバントはマスターの移動量よりもはるかに大きな移動量を要求される。つまり、サーバントはマスターに対してはるかに大きな移動速度を要求される。特に、サーバントの焦点位置が棒の支持高さ D と一致している場合には、ロボットが移動してもアーム先端は移動しないので、サーバントは無限大速度での移動を要求される。

以上のことから、マスターとサーバントの決定方法を以下のようにする。まず、各ロボットはある一定の移動量で動くものとして、アームの先端の移動量 ΔA (先行のロボットの ΔA を ΔFA , 後行のロボットの ΔA を ΔRA とする) を算出し、お互いの ΔA を比較し、相手の ΔA より自分の ΔA が小さい場合には自分がマスター、逆の場合には相手をマスターとし、マスターの ΔA に合わせた新たな移動位置を再計算しサーバントとなる。つまり

マスター : ΔA の小さいほう

(ルール 1)

サーバント : ΔA の大きいほう

とする。もしも、両者の ΔA が同じ場合には今までにマスタ

Fig. 14 Algorithm to determine the robot role, master or servant

であったロボットをマスターとする。以上のマスターサーバント決定アルゴリズムを Fig. 14 に示す。

ルール 1 を適用すると、マスターに対して、サーバントのほうがロボットの移動量に対するアームの先端の移動量が大きくなるので、マスターよりも移動量が常に小さくなる。言い換えれば、サーバントの速度はマスターの速度よりも常に小さい速度となる。ゆえに、Fig. 12 に示す場合のようにサーバントが、過大な速度を要求されることはなくなる。

以上のことが、「移動方向、移動量決定優先の互譲による協調」である。

5. 協調移動アルゴリズム

前章で述べた二つの「前後進の切り替えによる協調」、「移動方向、移動量決定優先の互譲による協調」を組み入れたロボットの協調移動アルゴリズムを Fig. 15 に示す。

先行のロボット、後行のロボットともに、協調移動アルゴリズムは共通である。以下に、アルゴリズムの説明を加える。

まず、自分の位置での路面の焦点が、路面と棒の支持高さ D との間にあるかどうかの H_p 情報と、終了判定を相手に送る。これは、最初はスタートの同期となり、次からは移動が終了したことを示す。

次に、相手の終了判定が送られたかをチェックし、送られていない場合は、送られてくるまで待つ。

次いで、送られてきた H_p 情報と自分の H_p 情報より、Table 2 に基づき移動方向を決定する。

決定した移動方向へ一定量移動できると仮定して、そのときのアーム先端が移動する距離 ΔA を計算し、送信する。送られてきた距離と、自分が送った ΔA とを比較し、自分の ΔA

Fig. 15 Cooperation algorithm in two-robots system

のほうが小さければマスターとなり、先に計算した移動量を採用し、相手が移動量を再計算するのを待つ。自分の ΔA のほうが大きければ、サーバントとなり、相手のアームの先端移動量 ΔA に合わせて自分の移動量を再計算する。再計算が終了したらその旨を送信する。

相手の再計算が終了するか、自分の再計算が終了したら計算した移動量分の移動をする。

移動の際、棒の支持条件が満たされなくなるなどのトラブルが発生したら異常終了とする。

移動後、タスクを達成していれば正常終了とし、達成していなければ最初に戻る。

ここで、以後、Fig. 15 に示したフローチャートの一巡を 1 STEP と呼ぶ。

6. シミュレーション結果と考察

5 章で提案したアルゴリズムを用いて、Fig. 7 から代表的な無次元支持高さ δ と無次元振幅 ζ の組合せを選び、シミュレーションを行った。比較として、前後進の切り替えのないアルゴリズムとマスターサーバントの切り替えのないアルゴリズムについても同様の条件でシミュレーションを行った。以下に、その結果について考察する。

Fig. 16 Simulation result; robot movement is stuck

Fig. 17 The Reason for "robot being stuck"

Fig. 18 Simulation result for "infinitely large velocity", "jump"

(1) 前後進の切り替えのないアルゴリズム

前後進の切り替えを行わない場合には、 $S \geq D$ の条件のときにはタスクを達成できたが、 $S < D$ の条件では途中で止まってしまう。Fig. 16(a), (b)にその代表的例を示す。Fig. 16(a)は横軸に水平移動距離、縦軸にstep数をとった、二つのロボットの移動軌跡を示しており、Fig. 16(b)は横軸にSTEP数を取り、縦軸に1STEPあたりの各ロボットの移動量とマスターサーバント状況(塗りつぶしのほうがマスター)を示している。ストップした理由は、Fig. 17において先行のロボットがマスターであるとする。F₁の位置からマスターが定速で移動し、F₂の位置まで移動すると、アーム先端は後退する。このとき、後行のロボットはR₂の位置しかとれない。しかし、サーバントは前後進の切り替えを行わないで、前方に移動しようとするので、移動すべき位置を探すことができずストップしてしまう。

(2) マスターサーバントの切り替えのないアルゴリズム

マスターサーバントの切り替えを行わない場合は1STEPにおける移動量が著しく大きくなるような状況(以後、無限大速度移動と呼ぶ)が生じる。この理由は、サーバントの焦点高さ H_p が棒の支持高さ D に近づいたため、Fig. 13より、ロボ

Fig. 19 Reason for "jump"

Fig. 20 Simulation result for "success"

ットの移動量に対するアームの先端移動量が非常に小さくなる。このため、マスターのアームの先端の移動量に合わせるため、サーバントが非常に大きな移動量を要求されたためである。無限大速度移動の代表的例をFig. 18(a), (b)に示す。

また、マスターサーバントの切り替えを行わない場合は、Fig. 18(a), (b)に代表的例を示したような跳躍挙動が起こる。この理由は、ロボットがそれぞれFig. 19のR₁, F₁に位置し、後行のロボットがマスターであるとする。すると、F₁の位置ではサーバントにおける H_p は棒の支持高さ D に一致する直前であり、マスター、サーバントともに前進である。その後、マスターが前方に定速で移動し、R₂の位置まで前進したとする。このとき、サーバントはF₁の位置から前方へ移動しようするとF₂へ移動するしかない。このため、跳躍挙動を生じる。

以上の無限大速度移動や跳躍挙動は解曲線に極大点、極小点が存在する $D \geq S$ の条件のときに起こる。

(3) 協調移動アルゴリズム

協調移動アルゴリズムを $D \geq S$ の条件に用いたシミュレーションの代表的結果をFig. 20(a), (b)に示す。Fig. 20(a), (b)を見ると、二つのロボットは、お互いに前後進とマスターサーバントを切り替えることにより、ストップ、無限大速度移動、跳躍挙動を生じることなくタスクを達成していることがわかる。

7. おわりに

本論文では、「長尺物を支持高さ、支持幅、傾きを一定に保ちながら、凹凸路面上を運搬する」というタスクを、縦列する同型の2台のロボットに行わせる際には

- 1) 「前後進切り替えによる協調」
- 2) 「移動方向、移動量決定優先の互譲による協調」

の二通りの運動学的協調が必要であることを示した。その際、「前後進切り替えによる協調」が必要となる無次元振幅 $\xi(=A/L)$ と無次元支持高さ $\delta(=D/A)$ の条件を明確にし、移動方向、移動量を決定する際に、どちらかのロボットにその決定優先を与える必要があることを示した。

無次元振幅 ξ と無次元支持高さ δ の条件により、路面の焦点の高さが棒の支持高さ D に接近、または、一致することがある。このとき、優先権を持つマスターのロボットの焦点の位置が棒の支持高さ D から十分離れており、サーバントの焦点の位置が棒の支持高さ D に近い場合には、サーバントは過大な移動速度を要求される。これを回避するために、「移動方向、移動量決定優先の互譲による協調」が必要となることを示した。

上記の二つの運動学的協調のいずれかひとつが欠けてしまうと、2台のロボットは無次元振幅 ξ と無次元支持高さ δ の条件により、1)「ストップ」、2)「ジャンプ」、3)「無限大速度移動」などの挙動を示し、タスクを達成できなくなることが明らかと

なった。これに対し、二つの運動学的協調を組み込んだ協調アルゴリズムを提案し、これに基づいて各ロボットが移動した場合、各ロボットはお互いに協調して、前後進の切り替えとマスターサーバントの切り替えを行い、どんな無次元振幅 ξ と無次元支持高さ δ の条件においてもタスクを達成することができることが明らかになった。

なお、一般の1次元凹凸路面への解析が、正弦波路面の解析手法の拡張として可能であることが確認できたので、第2報に掲載する予定である。

参考文献

- [1] 沢崎直之: “複数の知能ロボットによる協調作業”, 第1回ロボットシンポジウム予稿集, pp. 271-276.
- [2] 橋本雅文: “移動ロボット群による協同搬送作業”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'91講演論文集, pp. 223-226.
- [3] 梶谷 誠: “2台の移動ロボットによる長尺物の運搬”, 第10回日本ロボット学会予稿集, no. 2 pp. 557-560.
- [4] 武衛康彦: “複数の移動ロボットの協調による搬送作業の実現”, 第10回日本ロボット学会予稿集, no. 2, pp. 561-562.

安井裕司 (Yuji Yasui)

1969年9月20日生。1992年東京理科大学機械工学科卒業。現在、同大学大学院在学中。複数台のロボットにおける協調性の解析と制御の研究に従事。
(日本ロボット学会学生会員)

有竹俊之 (Toshiyuki Aritake)

1968年4月25日生。1993年東京理科大学機械工学科卒業。現在、同大学大学院在学中。複数台のロボットにおける協調性の解析と制御、ヒューマン・インタフェースロボットの研究に従事。

原文雄 (Fumio Hara)

1941年4月7日生。1970年東京大学大学院(博士課程)修了。1971年東京理科大学工学部助教授、1983年同教授。流体関連振動とその制御、ヒューマン・インタフェース、ロボットのダイナミクスと制御の研究に従事。工学博士。日本機械学会、ASME、IEEE等の会員。

(日本ロボット学会正会員)