学術論文

パラレルワイヤ駆動システムにおける ワイヤ座標系制御法

川 村 貞 夫^{*1} 木 野 仁^{*2} 崔 源^{*1} 勝 田 兼^{*3}

A Motion Control Scheme in Wire Length Coordinates for Parallel Wire Drive Systems

Sadao Kawamura^{*1}, Hitoshi Kino^{*2}, Won Choe^{*1} and Ken Katsuta^{*3}

Some types of parallel wire robots have been already proposed so far. Those parallel wire robot are useful for fast motion, heavy load and so on. Since each wire generates one directional force (tension), parallel wire drive system must be redundant actuating. In this paper, we analyze stability on a motion control scheme in wire length coordinates for parallel wire drive system. Taking account of such redundancy on actuation, motion stability is analyzed by using a Lyapunov function. Basing on "Vector Closure", it is proven that each wire length converges to the corresponding desired value and the internal force also converges to desired one. Finally, we experimentally investigate the motion accuracy on the proposed control scheme by using a parallel wire robot with seven wires.

Key Words: Pararell Wire Drive system, Stability, Wire Length Coordinates, Vector Closure

1. は じ め に

パラレルワイヤ駆動システムには、従来の他のシステムにない有用な特徴がある。特に注目すべき特徴としては、リンクの代わりに質量をほとんど無視できるワイヤを利用することがあげられる。これにより制御対象物の著しい軽量化が可能となる。したがって、従来のシリアルメカニズムやパラレルリンクメカニズムに比べ、構造が簡単、可動範囲が大きい、同じアクチュエータを利用する際に可搬重量が大きい、高速性等の利点がある。しかしワイヤを利用するがゆえに他の方法には現れない問題も生じる。最も特徴的な問題はワイヤが張力しか発生できない点から生じる。したがって、 n 自由度を制御するための最小ワイヤ本数は $n+1$ 本となる。この結果、システムは冗長駆動系とならざるを得ない。このシステムを利用した例としてはクレーンによる高荷重対象物制御やマスタスレーブシステムなどの報告がある [1] [3]~[5] [7]。また、特に高速性に着目し、超高速ロボットも開発されている [6] [8]。これらのシステムの実現に際しては、冗長駆動系であるワイヤ間の内力をどのように設定するかが問題となる。超高速ロボットなどの報告ではワイヤ間の内力を利用し、剛性を高める方法が検討されている。

パラレルワイヤ駆動システムにおいて、制御対象物の任意の位置姿勢における個々のワイヤ長さは、対象物に固定されたワイヤ端から、そのワイヤが導かれているアクチュエータのワイヤ出口までの距離によって算出することができる。したがってパラレルワイヤ駆動メカニズムは、一般のパラレルリンクメカニズムと同様に逆運動学を求めることが容易である。このことから目標位置姿勢でのワイヤ長さを算出し、各ワイヤ長さをフィードバックするワイヤ座標系制御法は有効な制御法の一つと考えられる。このような制御法において、PID 制御や重力補償+PID 制御、フィードフォワード+PID 制御の報告もされている [2]。しかしながら、このワイヤ座標系制御法において目標位置へのフィードバック入力と前述のワイヤ間の内力が重畳した入力、アクチュエータに与えられることになる。それゆえに、厳密にワイヤの目標位置に収束する保証はない。

そこで本論文では、ワイヤ座標系の PD 制御における目標位置への収束性を理論的に証明する。証明に際しては、ワイヤの弾性要素を無視でき、 n 自由度を $n+1$ 本のワイヤで実現する場合を考え、Vector Closure の概念より得られる結果を利用する。その結果、ワイヤ座標系制御により目標位置への漸近安定性が示される。最後に 7 本ワイヤを用いた 6 自由度ロボットにおいて、実験を行う。この実験より理論的解析では無視したワイヤ弾性要素の影響や逆運動学から生じる誤差などについて検討する。

2. パラレルワイヤ駆動ロボット

2.1 超高速ロボット FALCON-7

パラレルワイヤ駆動を用いた超高速ロボット FALCON-7

原稿受付 1997 年 7 月 8 日

^{*1}立命館大学理工学部

^{*2}滋賀医科大学マルチメディアセンター

^{*3}松下電器産業(株)

^{*1}Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University

^{*2}Multi-Media Center, Shiga University of Medical Science

^{*3}Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

Fig. 1 FALCON-7 system

Fig. 2 Actuator of FALCON-7

のシステム図を Fig. 1 に、アクチュエータ部を Fig. 2 示す。FALCON-7 は 7 本のワイヤを利用して制御対象物であるロッド（ハンド）の 6 自由度制御を行う。

ベース部であるフレームの大きさは 1.45 [m] × 1.45 [m] × 1.25 [m] であり、ベース部には 7 個のアクチュエータが配置されている。アクチュエータはジュラコン製のプリー（プリー径 65 [mm]）、歯車比 4 : 1 のギア、そして定格出力 60 [W] のエンコーダ付 DC サーボモータで構成されている。また、各ワイヤはロッドの運動とともに方向を変えるため、Fig. 2 に見られるようにワイヤ出口にはワイヤの方向に追従するような小型のガイドプリーが取り付けられている。使用するワイヤは直径 1 [mm] のスチール製である。ロッドはパイプ状で外径 10 [mm]、内径 8 [mm] のジュラルミン製であり、長さ 853 [mm]、質量 155 [g] である。また、演算を高速化するために DSP を利用している。

制御対象物であるロッドにおけるワイヤ端の位置関係を Fig. 3 に示す。3 本ワイヤの片端はロッドの上点に配置されており、残りの 4 本のワイヤはロッド下部に配置されている。個々のワイヤ端はアクチュエータ内の巻き取りプリーに接続されており、DC サーボモータで巻き取られる。

Fig. 3 Structure of FALCON-7

Fig. 4 Modeling of actuator system

2.2 問題設定とシステムダイナミクス

以下においては 7 本ワイヤ 6 自由度制御について説明する。ただし、ワイヤの質量、空気抵抗、アクチュエータワイヤ出口に設置されている小型ガイドプリーの方向による慣性の変化はその他の要素に比べ非常に微小であり無視できるものとする。使用するワイヤとアクチュエータはわずかに非線形バネ要素を有しているが、ここでは考慮しない。以下の制御では制御対象物は常に許容動作空間内にあり、Vector Closure (3.2 節) を満足すると仮定する。また、十分大きな内力を発生できるものとし、位置制御を行う場合は常にワイヤに張力を与えながら制御できるものとする。 i 番目のアクチュエータとワイヤを Fig. 4 のようにモデル化すれば、駆動系ダイナミクスは次式で表すことができる。

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + \alpha = \tau \quad (1)$$

ただし

$q = (q_1, q_2, \dots, q_7)^T \in R^7$: ワイヤ長さベクトル

q_i : i 番目のワイヤ長さ

$q_i = r_0\theta_i$

θ_i : i 番目プリー回転角度

r_0 : プリー半径

$A = \text{diag.}(a_1, a_2, \dots, a_7) \in R^{7 \times 7}$: 駆動系慣性行列

a_i : i 番目駆動部の慣性定数

$B = \text{diag.}(b_1, b_2, \dots, b_7) \in R^{7 \times 7}$: 駆動系粘性行列

b_i : i 番目駆動部の粘性定数

$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_7)^T \in R^7$: ワイヤ張力ベクトル

α_i : i 番目ワイヤの張力

$\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_7)^T \in R^7$: 駆動系発生力ベクトル
 τ_i : i 番目駆動部の発生力
 $\tau_i = \frac{T_i}{r_0}$
 T_i : i 番目アクチュエータトルク

とする。

一方、制御対象物のダイナミクスは、位置姿勢ベクトルを ϕ とすれば、ニュートン・オイラーの運動方程式より次式となる。

$$M\ddot{\phi} + h + d = f \quad (2)$$

上式において、

$$M = \begin{bmatrix} mE_3 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \in R^{6 \times 6}$$

m : 制御対象物質量

$E_3 \in R^{3 \times 3}$: 単位行列

$I \in R^{3 \times 3}$: 基準座標系 Σ_0 における慣性テンソル

$$h = (0^T \quad (\omega \times (I\omega))^T)^T \in R^6$$

$\omega \in R^3$: 角速度ベクトル

$$\dot{\phi} = (\dot{r}^T \quad \omega^T)^T \in R^6$$

$r = (x \quad y \quad z)^T \in R^3$: 制御対象物重心位置

$$d = (0 \quad 0 \quad mg \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T \in R^6$$

g : 重力加速度

$f \in R^{6 \times 6}$: 制御対象物に加わる力とモーメント

とする。

Fig. 5 に示すように、制御対象物に加わる力とモーメント f はワイヤ張力ベクトル α によって発生する。ここで f は次式で与えられる。

$$f = W\alpha \quad (3)$$

ただし、

$W = [w_1, w_2, \dots, w_7] \in R^{6 \times 7}$: ワイヤ行列

$$w_i = \begin{bmatrix} p_i \\ c_i \times p_i \end{bmatrix} \in R^6$$

$p_i \in R^3$: ワイヤ方向単位ベクトル

Fig. 5 Definition of coordinate systems

$c_i \in R^3$: 制御対象物の重心からワイヤ装着位置までのベクトル

$\times$: ベクトル積

とし、 W をワイヤ行列、 w_i をワイヤベクトルと定義する。

3. ワイヤ座標系制御法と安定性

3.1 ワイヤ座標系制御法

アクチュエータのワイヤ出口がプッシュ等でできており、ワイヤ出口が定点の場合は制御対象物の任意の位置姿勢における個々のワイヤ長さは、対象物に固定されたワイヤ端とそのワイヤが導かれているワイヤ出口との2点間の距離によって容易に算出することができる。ワイヤ出口にガイドプーリが設置してある場合は、ワイヤの方向によってワイヤとガイドプーリの接点が変わるので、このことを考慮する必要がある。ただし、ガイドプーリとワイヤとの接点の変化の少ない場合には、接点を定点として近似的に取り扱えば、逆運動学を容易に算出することができる。

ワイヤ座標系制御法は、はじめに逆運動学などにより目標位置姿勢 ϕ_d における目標ワイヤ長さを算出する。次に、この目標ワイヤ長さをベクトル q_d とし、内界センサを用いて各ワイヤ長さをフィードバック制御する。モータに与える制御入力を以下に示す。

$$\tau = K_p(q_d - q) - K_v\dot{q} + v + v_g \quad (4)$$

ただし、

$$K_p = \text{diag.}(k_{p1}, k_{p2}, \dots, k_{p7}) \in R^{7 \times 7}$$

: 位置フィードバックゲイン行列

$$k_{pi} > 0 \quad (i = 1, 2, \dots, 7)$$

$$K_v = \text{diag.}(k_{v1}, k_{v2}, \dots, k_{v7}) \in R^{7 \times 7}$$

: 速度フィードバックゲイン行列

$$k_{vi} > 0 \quad (i = 1, 2, \dots, 7)$$

$q_d = (q_{d1}, q_{d2}, \dots, q_{d7})^T \in R^7$: 目標ワイヤ長さベクトル

q_{di} : i 番目ワイヤの目標ワイヤ長さ

$v = (v_1, v_2, \dots, v_7)^T \in R^7$: ワイヤ内力ベクトル

$v_g = (v_{g1}, v_{g2}, \dots, v_{g7})^T \in R^7$: 重力補償ベクトル

とする。また、ワイヤ内力ベクトルはワイヤ行列 W の零空間に属するベクトルであり、次式を満足する。

$$Wv = 0 \quad v_i > 0 \quad (\text{for any } i) \quad (5)$$

式 (5) より、ワイヤ内力ベクトル v はワイヤ間の内力だけを発生し、ロッドの移動には影響のない入力であることが分かる。

最後に、重力補償ベクトル v_g はリアルタイムに重力を補償する項であり、式 (6) を満足する。

$$Wv_g = d \quad (6)$$

ただし、 v_g の設定は式 (5) の内力を含んで任意な値で実現される。そこで、ここでは余分な内力成分を持たないように v_g を設定することとする。

3.2 パラレルワイヤ駆動系の性質

ワイヤ座標系制御法の安定解析において、パラレルワイヤ駆動メカニズムは冗長駆動系であるため、従来のリアプノフ関数だけでは、目標ワイヤ長さへの収束性を証明できない。そこで、ここでは Vector Closure の概念より得られる結果を導出する [9]。

パラレルワイヤ駆動方式を用いたロボットではワイヤは張力方向にしか力を発生できないため、可動範囲内のすべての点でワイヤ行列 W が Vector Closure の条件を満足しなければならない [4]。まず、Vector Closure の概念を以下に示す。

Vector Closure

n 次元空間において、ワイヤベクトルの集合 W が以下の二つの条件を同時に満足するベクトルを少なくとも $n+1$ 本のベクトル ($w_1 \dots w_{n+1}$) を含むとき、 W は Vector Closure である。(必要十分条件)

(1) $n+1$ 個のベクトルのうち任意の n 個のベクトルが線形独立である

(2) 式 (7) を満たすベクトル $\beta = (\beta_1 \dots \beta_{n+1})^T$ が存在する。

$$W\beta = \sum_{i=1}^{n+1} \beta_i w_i = 0 \quad (7)$$

ここで、ベクトル β の各成分はすべて同一符号である。すなわち

$$\beta_i > 0 \quad \text{for any } i$$

または

$$\beta_i < 0 \quad \text{for any } i$$

とする。

Vector Closure において式 (7) を満たすすべて同符号の成分を持つ β が存在するということは、ワイヤの張力のみによって制御対象物に任意の力とモーメントを与えられるということである。したがって、Vector Closure を満たす領域がパラレルワイヤ駆動システムにおける許容動作空間に他ならない。

ここでは n 自由度を最小ワイヤ本数 $n+1$ 本で制御する場合について考える。このとき Vector Closure を満たすワイヤ行列 W の零空間に属する $n+1$ 次元ベクトル $x = [x_1 x_2 \dots x_{n+1}]$ ($Wx = 0$) が存在すると考える。Vector Closure の二つの条件より、 W の零空間に属する $n+1$ 次元ベクトル β は、例えば x_{n+1} を用いて以下の式で表される。

$$\beta = \begin{bmatrix} -\hat{W}^{-1} w_{n+1} \\ 1 \end{bmatrix} x_{n+1} \quad (8)$$

ただし、 $\hat{W} = [w_1 w_2 \dots w_n]$ である。すなわち、 x_{n+1} の値を任意に選べるものの、他の成分は x_{n+1} の値を決めると一意に決定される。これは、 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ としても同様である。したがって、ワイヤ行列 W の零空間に属する一般の $n+1$ 次元ベクトル x に関して、次の結果を得ることができる。

RESULT 1

n 次元空間における $n+1$ 個のワイヤベクトル $w_i (1 \leq i \leq n+1)$ が Vector Closure を満たすとき、行列 $W = [w_1 w_2 \dots w_{n+1}]$ の零空間に属する $n+1$ 次元ベクトル $x (Wx = 0)$ は必ず以下の三つの内のいずれか一つを満足する。

$$\text{CASE(1)} \quad x_i = 0 \quad \text{for any } i$$

or

$$\text{CASE(2)} \quad x_i > 0 \quad \text{for any } i$$

or

$$\text{CASE(3)} \quad x_i < 0 \quad \text{for any } i$$

次に、目標ワイヤ長さへの収束性の証明において重要な関係を導出する。手先の位置姿勢ベクトルの微小変化量 $\delta\phi$ とワイヤ長さベクトルの微小変化量 δq の間には、ワイヤ長さの対象物位置姿勢に関するヤコビ行列より次式が成り立っている [5]。

$$\delta q = W^T \delta \phi \quad (9)$$

ここで、Vector Closure の式 (7) を用いれば、

$$\beta^T \delta q = \beta^T W^T \delta \phi = 0 \quad (10)$$

となる。いま、Vector Closure を満たす領域内における 2 点の異なる任意の手先位置姿勢について考える。ワイヤの特性より実際には張力のみ作用するので、 β の符号は張力方向を正とする。それぞれの位置姿勢におけるワイヤ長さベクトルを $q_s = [q_{s1} q_{s2} \dots q_{sn+1}]$ と $q_e = [q_{e1} q_{e2} \dots q_{en+1}]$ とし、ワイヤ長さベクトルが q_s から q_e へ変化したとする。式 (10) を i 番目のワイヤについて q_{si} から q_{ei} 積分すれば、次式を得る。

$$\sum_{i=1}^{n+1} \int_{q_{si}}^{q_{ei}} \beta_i(q) dq_i = 0 \quad (11)$$

β_i はベクトル q に依存する値であるが、Vector Closure を満たす領域内であるかぎり、 β_i はすべて正もしくはすべて負の値しか持たない。したがって式 (11) を満足するためには二つのベクトル q_s と q_e の要素のなかで、少なくとも一つは大小関係が他と異なる必要がある。言い換えれば、ベクトル $q_e - q_s$ の成分は必ず正の成分と負の成分の両方を持つことが分かる。したがって、以下の結果を得ることができる。

RESULT 2

Vector Closure を満たす領域内において、二つの異なるワイヤ長さベクトル q_e と q_s を考えたとき、この二つのベクトルの差 $q_e - q_s$ は正と負の両方の成分を持つ。

別の表現をすれば、Vector Closure を満たす領域内において、対象物が異なる任意の 2 点を移動するとき、すべてのワイヤ長さを増加（もしくは減少）させる場合は存在せず、必ずどれか一つのワイヤ長さは減少（もしくは増加）することとなる。

3.3 安定性証明

6 自由度 7 本ワイヤシステムにおけるリアプノフ関数の候補として、スカラ関数 V を次式で与える。

$$V = \frac{1}{2} \dot{q}^T A \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{\phi}^T M \dot{\phi} + \frac{1}{2} (q_d - q)^T K_p (q_d - q) \quad (12)$$

これをシステムダイナミクスの解軌道に沿って時間微分する.

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \dot{q}^T A \dot{q} + \dot{\phi}^T M \dot{\phi} \\ &\quad + \frac{1}{2} \dot{\phi}^T \dot{M} \dot{\phi} - \dot{q}^T K_p (q_d - q)\end{aligned}\quad (13)$$

上式に式 (1), 式 (2) を代入する.

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \dot{q}^T (-B \dot{q} - \alpha + \tau) + \dot{\phi}^T (-h - d + f) \\ &\quad + \frac{1}{2} \dot{\phi}^T \dot{M} \dot{\phi} - \dot{q}^T K_p (q_d - q)\end{aligned}\quad (14)$$

さらに, 式 (3), 式 (4) より,

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \dot{q}^T (-B \dot{q} - \alpha + K_p (q_d - q) - K_v \dot{q} + v + v_{gd}) \\ &\quad + \dot{\phi}^T (-h - d + W \alpha) \\ &\quad + \frac{1}{2} \dot{\phi}^T \dot{M} \dot{\phi} - \dot{q}^T K_p (q_d - q).\end{aligned}\quad (15)$$

ここで以下のように, 式 (16) が成立し, またよく知られているように式 (17) が成立している [5] [10].

$$\dot{q} = W^T \dot{\phi} \quad (16)$$

$$\dot{\phi}^T \left(\frac{1}{2} \dot{M} \dot{\phi} - h \right) = 0 \quad (17)$$

式 (5), (6) を用いれば結局式 (18) を得る.

$$\dot{V} = -\dot{q}^T (B + K_v) \dot{q} \leq 0 \quad (18)$$

よって $\dot{V} = 0$ の最大不変集合に収束する. この場合は $\dot{q} = \ddot{q} = 0$ であり, このときのワイヤ張力ベクトルは次式となる.

$$\alpha = \tau = K_p (q_d - q) + v + v_{gd} \quad (19)$$

また, 式 (2) は

$$d = W \alpha \quad (20)$$

となる. 式 (6), (5), (19), (20) よりシステムのダイナミクスは次式に収束する.

$$W K_p (q_d - q) = 0 \quad (21)$$

ここでワイヤ行列 W は 6×7 行列であり $\text{rank}(W)=6$ である. ベクトル $K_p (q_d - q)$ は七次元ベクトルである. よってこのベクトルは W の零空間に属し, ワイヤ長さベクトル q は時間無制限で式 (21) を満足する空間に収束することが分かる.

一般にベクトル $K_p (q_d - q)$ が行列 W の零空間に属するベクトルであれば, 自明解 $K_p (q_d - q) = 0$ と非自明解である $K_p (q_d - q) \neq 0$ の解が存在する. RESULT 1 より Vector Closure である限り零空間に属する解は $(q_d - q)$ の成分のすべてが同符号でなければならない. しかし一方で RESULT 2 より, Vector Closure を満たす領域内において, 対象物が異なる任意の 2 点を移動するとき, すべてのワイヤ長さを増加 (もしくは減少) させる場合は存在せず, 必ずどれか一つのワイヤ長さは減少 (もしくは増加) することが明かにされている.

つまりこの場合, 非自明解は存在せず, 自明解 $K_p (q_d - q) = 0$ だけが存在し得る. したがって, ワイヤ長さベクトル q は目標ワイヤ長さベクトル q_d に収束することが証明された.

3.4 重力補償項が定数の場合

制御入力において重力補償項をリアルタイムで計算せず, 目標ワイヤ長さにおける重力補償を定数項として与える場合を考える. 制御入力を式 (4) に代わり次式で与える

$$\tau = K_p (q_d - q) - K_v \dot{q} + v + v_{gd} \quad (22)$$

ベクトル v_{gd} は目標位置における定数重力補償であり, $n+1$ 次元ベクトルである. 目標ワイヤ長さベクトル q_d におけるワイヤ行列を W_d とおけば, v_{gd} は式 (23) で与えられる.

$$v_{gd} = \left. \frac{\partial \phi}{\partial q} \right|_{q_d}^T d \quad (23)$$

ここで次式を考える.

$$V^* = \frac{1}{2} \dot{q}^T A \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{\phi}^T M \dot{\phi} + \frac{1}{2} (q_d - q)^T K_p (q_d - q) + Q \quad (24)$$

ただし

$$Q = U(q) - U(q_d) - v_{gd}^T (q - q_d) \quad (25)$$

とし, $U(q)$ はワイヤ長さベクトル q における制御対象物のポテンシャルエネルギーとする.

いま, $U(q)$ を q_d の近傍でテーラ展開すると,

$$U(q) = U(q_d) + \left. \frac{\partial U}{\partial q} \right|_{q_d} (q - q_d) + T \quad (26)$$

となる. 上式において 2 次以降の項を T とおいた. 第 2 項について考えると,

$$\left. \frac{\partial U}{\partial q} \right|_{q_d}^T = \left(\left. \frac{\partial U}{\partial \phi} \right|_{q_d} \left. \frac{\partial \phi}{\partial q} \right|_{q_d} \right)^T = \left. \frac{\partial \phi}{\partial q} \right|_{q_d}^T d = v_{gd} \quad (27)$$

である. したがって $Q = T$ となり, $q - q_d$ が小さく, K_p が十分大きければ V^* は正定関数となり, リアプノフ関数の候補となる. V^* をシステムの解軌道に沿って微分すれば, 式 (18) となり先の論議同様, 目標ワイヤ長さに収束する.

4. 実験による考察

4.1 ワイヤ弾性要素

本論文中, これまでの理論考察ではワイヤの剛性は十分大きく, ワイヤは伸びないと仮定し, ワイヤ長さとワイヤ間の内力は別々に取り扱ってきた. しかし実際には今まで我々が報告してきたように [8], ワイヤ駆動系システムには非線形バネ要素が含まれており, 張力を与えることによって伸びが生じる. そこで FALCON-7 を用いてワイヤ座標系制御法の実験を行った. 本論文で用いた実験システムは, 参考文献 [8] の場合よりは剛性が高いものの, ロッドが可動部の中心点付近で, ワイヤ 1 [m] 当たり 0.03 [mm/N] 程度の剛性となっている. ワイヤ間内力はロッドの手先の位置姿勢によって変化するので, 厳密にワイヤ長さを決定するためには, 各位置姿勢における内力の誤差から生じるワイヤの伸び量が, 停止精度にどの程度影響を与えるかを明らかにする必要がある.

次に、アクチュエータの据え付け誤差やフレームの歪みなどから生じる運動学、逆運動学の誤差が、どの程度位置精度を劣化させるかを実験的に調べることも重要である。以下の実験では、上記の2点を明らかにすることを目的とする。

4.2 逆運動学により得られた目標ワイヤ長さを利用した場合

実験手順としては、まず初期手先位置座標を(500,500,-500)とし、ロッドが鉛直軸に平行とした。また、内力として上部のワイヤに対して15, 15, 23 [N]、下部のワイヤに対して9.5, 9.5, 9.5, 9.5 [N]と設定した。この状態でのワイヤ長さを計測し、初期状態のワイヤ長さとした。次に目標手先位置を鉛直方向に-100 [mm]並行移動させた位置(500,500,-600)とし、逆運動学により目標ワイヤ長さを算出し、その目標ワイヤ長さについて重力補償は目標位置の定数項として与えながらフィードバックを行った。したがって、この実験では初期位置と目標位置におけるワイヤ間の内力差によって生じるワイヤの伸びを無視している。順運動学、逆運動学に関しては手先位置が変化するとアクチュエータ部の小型ガイドプーリとワイヤの接点が変わるので、これを考慮する必要がある。しかしながら計算を単純化する目的で、今回はガイドプーリとワイヤの接点を定点とした近似式を用いている。ただし、この近似による実際のワイヤ長さの誤差は最大で約0.16 [mm]程度である。

実験結果として*i*番目のワイヤに関して、収束したワイヤ長さを q_{ei} とすると、定常偏差は最大で、

$$\max_i |q_{di} - q_{ei}| = 1.8 \text{ [mm]} \quad (28)$$

であった。制御対象物の収束位置に実際の内力（および目標内力）はおおの、上部のワイヤに対して15.9(14.3), 15.8(14.3), 23.5(22.5) [N]、下部のワイヤに対して14.8(13.4), 14.1(13.4), 14.5(13.4), 14.5(13.4) [N]に収束している。各ワイヤの初期状態内力と目標位置内力との差 ev_i は最大で、

$$\max_i |ev_i| = 5 \text{ [N]} \quad (29)$$

である。単位長さ当たりの剛性を考慮すると、この内力の差から生じるワイヤ長さの最大誤差 el_i は、

$$\max_i |el_i| = 0.1 \text{ [mm]} \quad (30)$$

となる。以上の結果と式(28)の結果およびガイドプーリの誤差が約0.16 [mm]程度であることから、ワイヤの弾性による位置誤差以外の原因によって定常偏差が生じていることが分かる。定常偏差の他の主な原因としては、

- アクチュエータやワイヤの取り付け誤差により逆運動学計算に誤差が含まれており、目標ワイヤ長さ q_d を実現できない。
 - 運動学計算誤差により釣り合い内力に誤差が含まれる。
 - 摩擦が影響を与えている。
 - 重力補償項に誤差が含まれる。
- などが考えられる。

4.3 ダイレクトティーチングにより得られた目標ワイヤ長さを利用した場合

次にダイレクトティーチングにより目標ワイヤ長さを求めて同様の位置制御実験を行った。実験手順としては、初期手先座標を(500,500,-500)として、まず初期状態としては4.2節の実験と同じとした。次に内力をロッドの各位置姿勢でリアルタイム計算しながら、モータ入力に与え、オペレータが手先を鉛直*z*軸方向に100 [mm]移動させた。目標位置において内力を付加した状態でのそのときのワイヤ長さを目標ワイヤ長さとし、フィードバックを行った。したがって、目標位置姿勢における適切な内力を考慮した目標ワイヤ長さとなっている。この実験による定常偏差は

$$\max_i |q_{di} - q_{ei}| = 0.6 \text{ [mm]} \quad (31)$$

である。また、内力は上部のワイヤに対して14.9(14.4), 14.4(14.4), 22.2(22.5) [N]、下部のワイヤに対して14.3(12.8), 12.6(12.8), 12.8(12.8), 11.7(12.8) [N]に収束している。逆運動学を用いて目標ワイヤ長さを求める場合と比較して、定常偏差は1/3に減少した。したがって、4.2節の場合の誤差の主な原因は運動学、逆運動学であることが明らかとなった。ダイレクトティーチングの場合も0.6 [mm]程度の誤差が生じている。これは主に摩擦による影響と考えられる。最後に再現精度については4.2節の場合を含めて約0.2 [mm]程度であることを報告しておく。

5. おわりに

本報告ではパラレルワイヤ駆動システムにおいて、 $n+1$ 本のワイヤを用いて*n*自由度の制御を行う場合、Vector Closureから得られる特徴として次のことを明らかにした。

- ワイヤ行列 $W \in R^{n \times n+1}$ の零空間に属する $n+1$ 次元ベクトルはその成分がすべて正か負もしくはすべて0である。
- Vector Closureを満たす領域内を制御対象物が異なる2点を移動するとき、すべてのワイヤ長さを増加（もしくは減少）させる場合は存在せず、必ずどれか一つのワイヤ長さは減少（もしくは増加）する。

そして、これらの結果を用いて6自由度7本ワイヤのワイヤ座標系制御法において以下のことを示した

- 実時間で重力を補償する場合のワイヤ座標系制御法の安定性とワイヤ長さの目標値への収束性。
- 重力を目標位置における定数として補償する場合のワイヤ座標系制御法の安定性とワイヤ長さの目標値への収束性。

また、ワイヤ座標系制御法のPTP位置制御実験を行った。逆運動学を用いて目標ワイヤ長さ q_d を求めた場合に大きな定常偏差が生じ、ダイレクトティーチングを用いて目標ワイヤ長さ q_d を求めた場合には定常偏差が減少することを実験で確認した。今回はワイヤ座標系の偏差によってのみ評価を行ったが、実用上は作業座標系での手先位置の誤差が重要であるので、今後は据え付け誤差を含むキャリブレーション問題を考え、作業座標系での誤差を議論していく必要がある。

参 考 文 献

- [1] 樋口俊郎, 明愛国: “ワイヤー駆動を利用したスタックークレーンの開発—第3報 フィードフォワード制御の適用—”, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.503-504, 1988.
- [2] T. Higuchi and A. Ming: “Study on Multiple Degree-of-Freedom Positive Mechanism Using Wires,” Proceeding of Asian Conference on robotics and its application, pp.101-106, 1991.
- [3] 大隅久, 新井民夫, 浅間一: “3本ワイヤを有する7自由度クレーンの開発(第1報)”, 精密工学会誌, vol.59, no.5, pp.767-772, 1993.
- [4] S. Kawamura and K. Ito: “A New Type of Master Robot for Teleoperation Using A Radial Wire Drive System,” Proc. of the 1993 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, vol.1, pp.55-60, 1993.
- [5] 大隅久, 沈干思, 新井民夫: “ワイヤ懸垂系における操り指標”, 日本ロボット学会誌, vol.12, no.7, pp.1049-1055, 1994.
- [6] S. Kawamura, W. Choe, S. Tanaka and S.R. Pandian: “Development of an Ultrahigh Speed Robot FALCON using Wire Drive System,” IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.215-220, 1995.
- [7] 森園哲也, 井田瑞人, 和田隆広, 川村貞夫: “パラレルワイヤ駆動システムによるバーチャルテニスの試み”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.1, pp.153-161, 1997.
- [8] 川村貞夫, 崔源, 田中訓, 木野仁: “パラレルワイヤ駆動方式を用いた超高速ロボット FALCON の開発”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.1, pp.82-89, 1997.
- [9] V.D. Nguyen: “Constructing Force-Closure Grasp in 3D,” Proc. of the 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.240-245, 1987.
- [10] 有本卓: ロボットの力学と制御. 朝倉書店, 1991.

川村 貞夫 (Sadao Kawamura)

1956年7月10日生。1981年大阪大学基礎工学部生物工学科卒業。1986年同大学大学院機械工学科博士課程修了。同年同大学同学科助手。1987年立命館大学理工学部機械工学科助教授を経て、1995年同大学同学科教授。1996年同大学ロボティクス学科教授。学習制御、生体ロボティクス等の研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会、システム制御情報学会、IEEEなどの会員。
(日本ロボット学会正会員)

崔 源 (Won Choe)

1967年10月1日生。1989年韓国漢陽大学機械工学科卒業。1992年立命館大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程修了。現在同大学大学院博士後期課程に在学中。高速ロボット、ロボットの剛性および振動解析などを研究。日本機械学会、計測自動制御学会、IEEEなどの会員。
(日本ロボット学会学生会員)

木野 仁 (Hitoshi Kino)

1971年3月13日生。1994年立命館大学理工学部機械工学科卒業。1996年同大学大学院理工学研究科情報システム学専攻修士課程修了。同年同大学大学院同研究科総合理工学専攻博士後期課程に入学。1997年3月退学後、1997年4月より滋賀医科大学マルチメディアセンター勤務。パラレルメカニズム、医療福祉ロボットの設計などに興味を持つ。
(日本ロボット学会正会員)

勝田 兼 (Ken Katsuta)

1973年2月26日生。1995年立命館大学理工学部機械工学科卒業。1997年同大学大学院理工学研究科修士課程修了後、現在松下電器産業(株)に勤務。
(日本ロボット学会正会員)