パラレルワイヤ駆動システムの 作業座標系制御法とそのロバスト性

木野 仁^{*1} 矢部 茂^{*2} Chien Chern Cheah^{*3}
川村 貞夫^{*2} 有本 卓^{*2}

A Motion Control Scheme in Task Oriented Coordinates and its Robustness for Parallel Wire Driven Systems

Hitoshi Kino^{*1}, Sigeru Yabe^{*2}, Chien Chern Cheah^{*3},
Sadao Kawamura^{*2} and Suguru Arimoto^{*2}

Parallel wire driven robots have some advantages such as high speed, heavy load and so on. In the previous works in the parallel wire driven robots, the object or the end-effector is controlled through each wire length. However, each actuator position in the base coordinates and each measured length of wires include errors. Therefore, even if fine positioning in wire length coordinates is realized, the end-effector position may deviate from a desired position in task oriented coordinates. To overcome such difficulty, we propose a new motion control scheme for the parallel wire driven robots in this paper. In the proposed scheme, a pseudo inverse matrix which shows the relation between a wire tensions vector and a force vector of the end-effector is utilized to operate the object in the task oriented coordinates. When the proposed control scheme based on the force relation is used, it is easy to attain more precise positioning by using external sensors such as cameras, and to apply it to force control. In this paper, we prove the motion convergence to desired points and discuss its robustness based on Lyapunov stability analysis. Finally the usefulness of the proposed control scheme is demonstrated through some experimental results.

Key Words: Pararell Wire, Stability, Task Oriented Coordinates, Robustness

1. はじめに

パラレルワイヤ駆動システムは単一方向駆動多自由度機械システムの一種類である。単一方向駆動多自由度機械システムとは、対象物体の操作を行う際にアクチュエータからの力伝達が引っ張りもしくは圧縮のどちらかのみによって行われるものであり、他の代表的な単一方向駆動多自由度機械システムとしては指ロボットなどが挙げられる。パラレルワイヤ駆動機構はリンクの代わりにワイヤを利用しているのが特徴であり、ワイヤをアクチュエータで巻き取ることによって対象物を制御する。手先稼働部の軽量化に伴い、構造が簡単、並進の可動範囲が大きい、可搬重量が大きい、高速性などの利点がある。しかしながら、ワイヤは張力しか発生できないため、 n_0 自由度を制御するためのワイヤ本数は $n_0 + 1$ 本以上となり、冗長駆動系とならざるを得ない[1]。また、現在このシステムと類似の方法を利用した様々な応用が提案されている[2]~[7]。

パラレルワイヤ駆動システムの制御法には、対象物体の位置姿勢を各ワイヤ長さに換算する制御法と対象物体に働く力をワイヤの張力に換算する制御法が考えられる。前者を位置制御に利用する場合には対象物体の目標位置姿勢での目標ワイヤ長さを算出し、これについてフィードバック制御を行えばよい。これは一般のロボットにおける関節角制御の方法と類似する。すでに筆者らはワイヤ座標系制御法については最少ワイヤ本数の場合について、Vector Closureの条件を用いて目標ワイヤ長さに収束することを証明している。さらに、実験によってその有用性を確かめている[8]。しかしながら、実際には逆運動学計算にアクチュエータ配置誤差やプーリ巻き取り誤差などが存在するため、内界センサによるフィードバックだけでは手先に位置誤差が生じる。同様な制御法でも内界センサの代わりに外界センサを用いてワイヤ座標系制御を行う場合も考えられる。これは外界センサより得られた対象物体の位置座標から逆運動学を用いてリアルタイムでワイヤ長さを算出し、ワイヤ長さについてフィードバック制御を行う方法である。この方法では内界センサに比べ位置誤差が少ないと考えられるが、力制御を行う場合では有効ではない。

一方、後者の力関係に基づく制御法はカメラなどの外界センサを用いて対象物体の作業座標系での位置姿勢を計測し、作業座標系でフィードバックを行うことができる。一般のシリアル

原稿受付 1999年4月8日

^{*1}滋賀医科大学マルチメディアセンタ

^{*2}立命館大学理工学部

^{*3}Nanyang Technological University

^{*1}Multi-Media Center, Shiga University of Medical Science

^{*2}Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University

^{*3}Nanyang Technological University

リンクロボットの作業座標系制御法では順運動学を時間常微分した関係から得られたヤコビ行列 J の転置行列 J^T を用いる方法が広く知られている [9]. また, J^T は関節トルクと手先発生力を関係付けるヤコビ行列であるので, 力制御への拡張も容易である. しかし, パラレルワイヤ駆動システムについて J^T 制御方法に対応する制御方式は提案されていない.

そこで本論文ではパラレルワイヤ駆動システムの作業座標系制御法としてワイヤ行列 W の擬似逆行列 W^+ を用いた方法を提案する. ワイヤ行列 W はワイヤ張力ベクトルを対象物体発生力ベクトルに変換する行列であり, 原理的には力の関係を用いるという点では J^T の方法と同じであるが, ワイヤ行列 W は非正方行列であるので, 対象物体発生力ベクトルからワイヤ張力ベクトルを求めるには擬似逆行列 W^+ が必要となる. この方法は作業座標系で直接フィードバックするため, 内界センサを利用した関節座標系制御法に比べて高精度の位置決めが容易であり, アクチュエータ配置誤差に対するロバスト性も高いと期待される. また, 力制御への応用が可能であるので, 有効な制御法の一つと考えられる. 以下では, はじめにリアプノフの方法で安定性について論じ, ワイヤ行列に誤差を含む場合についてのロバスト性について解析を行う. さらに実際に 4 本ワイヤを用いた平面 3 自由度ロボットにおいて, 外界センサを用いた位置制御と力制御を行い, 本制御法の性能とロバスト性を確認する.

2. システムダイナミクス

以下においては一般的な m 本ワイヤを用いて n_0 ($m > n_0$) 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ブリー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 [1] [8] 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, 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. このような仮定のもとに駆動系ダイナミクスは次式で表すことができる.

$$M\ddot{q} + B\dot{q} = \tau - \alpha_t \quad (1)$$

ただし

- $q = (q_1, q_2, \dots, q_m)^T \in R^m$: ワイヤ長さベクトル
- $M = \text{diag.}(a_1, a_2, \dots, a_m) \in R^{m \times m}$: 駆動系慣性行列
- a_i : i 番目駆動部の慣性定数 ($a_i > 0$)
- $B = \text{diag.}(b_1, b_2, \dots, b_m) \in R^{m \times m}$: 駆動系粘性行列
- b_i : i 番目駆動部の粘性定数 ($b_i > 0$)
- $\alpha_t = (\alpha_{t1}, \alpha_{t2}, \dots, \alpha_{tm})^T \in R^m$: ワイヤ張力ベクトル
- α_{ti} : i 番目ワイヤの張力
- $\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m)^T \in R^m$: 駆動系発生力ベクトル
- τ_i : i 番目駆動部の発生力

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 x とすれば次式となる.

Fig. 1 Definition of coordinate systems

$$M_0 \ddot{x} + \left(\frac{1}{2} \dot{M}_0 + S_0(x, \dot{x}) \right) \dot{x} + g_0 = f \quad (2)$$

上式において,

$M_0 \in R^{n_0 \times n_0}$: 基準座標系 Σ_0 から見た慣性行列

$S_0(x, \dot{x}) \in R^{n_0 \times n_0}$: 歪対称行列

$\dot{x} = (\dot{x}^T \ \omega^T)^T \in R^{n_0}$

ω : 角速度ベクトル

r : 制御対象物重心位置

$g_0 \in R^{n_0}$: 重力項

$f \in R^{n_0}$: 制御対象物に加わる力とモーメント

とする. Fig. 1 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_t によって発生する. ここで f は次式で与えられる.

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

ただし,

$W = [w_1, w_2, \dots, w_m] \in R^{n_0 \times m}$: ワイヤ行列

$w_i = \begin{bmatrix} p_i \\ c_i \times p_i \end{bmatrix} \in R^{n_0}$

p_i : ワイヤ方向単位ベクトル

c_i : 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. 式 (3) より, ワイヤ行列 W は制御対象物に加わる力とモーメントベクトル f とワイヤ張力ベクトル α_t とを関係付ける行列であり, 以下の関係が成立する.

$$\alpha_t = W^+ f + (I - W^+ W) k_e \quad (4)$$

W^+ は W の擬似逆行列であり, $W^+ = W^T(WW^T)^{-1}$ で定義される. また, 右辺第 2 項は内力を意味し, $k_e \in R^m$ は任意のベクトルである. Vector Closure を満足すれば, $(I - W^+ W) k_e > 0$ とでき, α_t の各要素が正となる.

3. 作業座標系制御法

3.1 安定解析

次に制御入力の説明をする. 対象物の目標位置姿勢を x_d としたとき, 外界センサなどで計測した x を利用して, 制御入力 τ を次式で与える.

$$\tau = W^+ (K_p(x_d - x) - K_v \dot{x} + g_0) + v \quad (5)$$

$K_p, K_v \in R^{n_0 \times n_0}$: フィードバックゲイン

ここで, Vector Closure を満たす範囲では, 行列 WW^T は常に正則となる. また, v はワイヤ間の内力を生む入力であり, 常に以下の条件を満たす.

$$Wv = 0 \quad (6)$$

ワイヤ長さベクトル q と位置姿勢ベクトル x の幾何学的関係である逆運動学に注目すると,

$$\dot{q} = W^T \dot{x} \quad (7)$$

となる [10]. 行列 W の各要素は, $\sin$ および $\cos$ の三角関数であるので微分可能であり,

$$\ddot{q} = W^T \ddot{x} + \dot{W}^T \dot{x} \quad (8)$$

が成立する. 結局, 上式と式 (1) (2) (3) (5) (6) より, 作業座標系制御法のシステムダイナミクスとして次式を得る.

$$(M_0 + WMW^T)\ddot{x} + (WM\dot{W}^T + WBW^T + K_v)\dot{x} + h_0 - K_p(x_d - x) = 0 \quad (9)$$

ただし上式において, $h_0 = (\frac{1}{2}\dot{M}_0(x) + S_0(x, \dot{x}))\dot{x}$ とする. ここで制御方式によって, 安定かつ x が目標位置 x_d に収束することをリアプノフの安定性を用いて証明する. スカラ関数 V を次式で与える.

$$V = \frac{1}{2}\dot{x}^T(M_0 + WMW^T)\dot{x} + \frac{1}{2}(x_d - x)^T K_p(x_d - x) \quad (10)$$

$M_0 + WMW^T > 0$, $K_p > 0$ より, スカラ関数 V はリアプノフ関数の候補となる. スカラ関数 V をシステムの解軌道に沿って時間微分し, 良く知られているように $\dot{x}^T(\frac{1}{2}\dot{M}_0\dot{x} - h_0) = 0$ の関係 [9] を用いれば次式を得る.

$$\dot{V} = -\dot{x}^T(K_v + WBW^T)\dot{x} \leq 0 \quad (11)$$

したがって, $\dot{V} = 0$ の最大不変集合に収束する. この場合は $\ddot{x} = \dot{x} = 0$ である. これらをダイナミクス代入することにより $K_p(x_d - x) = 0$ に収束することがわかる. よって $t \rightarrow \infty$ のとき, $x \rightarrow x_d$ となり, 手先は目標位置に収束し, 駆動系発生力 τ は式 (12) に収束する.

$$\tau = W^+ g_0 + v \quad (12)$$

4. 作業座標系制御法におけるロバスト性

作業座標系制御法は外界センサなどを用いて対象物の位置姿勢を計測し, フィードバックする. しかしながら, 駆動部の取り付け誤差やワイヤの取り付け誤差などから十分に正確なワイヤ行列を得ることは困難である場合も多い. そこでワイヤ行列のロバスト性を論じる. 以下では行列 A の推定量を $\hat{A}$ とする. ワイヤ行列に推定量を用いた作業座標系フィードバックの制御入力を示す.

$$\tau = \hat{W}^+(-K_p\Delta x - K_v\dot{x} + \dot{g}_0) + \hat{J}_m^T k_d \quad (13)$$

ここで, $(I - \hat{W}^+ \hat{W}) = \hat{J}_m^T$, $\Delta x = x - x_d$ であり, k_d は内力を発生するために設定するベクトルである. また, 式 (13) における推定行列に関しては, 適当な値の正数 p_1 による以下の有界性を仮定する.

$$\|W^+ - \hat{W}^+\| \leq p_1 \quad (14)$$

式 (1) (4) (13) より,

$$M\ddot{q} + B\dot{q} + \hat{W}^+(K_p\Delta x + K_v\dot{x} - \dot{g}_0) = -W^+ f + J_m^T \delta k - \delta_{Jm} k_d \quad (15)$$

となる. ただし, $\delta k = k_d - k_e$, $\delta_{Jm} = J_m^T - \hat{J}_m^T$ とする. ここでリアプノフ関数としてスカラ関数 V を考える.

$$V = \frac{1}{2}\dot{q}^T M\dot{q} + \alpha\Delta x^T W M\dot{q} + \frac{1}{2}\dot{x}^T M_0\dot{x} + \alpha\Delta x^T M_0\dot{x} + \frac{1}{2}\Delta x^T (K_p + \alpha K_v)\Delta x \quad (16)$$

式 (16) は式 (17) のように変形できる.

$$V = \frac{1}{4}\dot{q}^T M\dot{q} + \frac{1}{4}\dot{x}^T M_0\dot{x} + \frac{\alpha}{2}\Delta x^T K_v\Delta x + \frac{1}{4}(\dot{q} + 2\alpha W^T \Delta x)^T M(\dot{q} + 2\alpha W^T \Delta x) + \frac{1}{4}(\dot{x} + 2\alpha \Delta x)^T M_0(\dot{x} + 2\alpha \Delta x) + \Delta x^T \left(\frac{1}{2}K_p - \alpha^2(WMW^T + M_0) \right) \Delta x \quad (17)$$

フィードバックゲインを適当な大きさに与え, α を小さくすれば,

$$K_p > 2\alpha^2(WMW^T + M_0) \quad (18)$$

を満足し, スカラ関数 V は正定値となり, リアプノフ関数の候補となる. 一方, この時間微分に関して次式を得る.

$$\begin{aligned} -\frac{dV}{dt} &= \dot{x}^T(K_v + WBW^T)\dot{x} + \alpha\Delta x^T K_p\Delta x \\ &\quad - \dot{x}^T \Gamma K_v \dot{x} - \alpha\Delta x^T \Gamma K_p \Delta x \\ &\quad - \dot{x}^T \Gamma K_p \Delta x - \alpha\Delta x^T \Gamma K_v \dot{x} \\ &\quad + \alpha h + z^T \delta_1 \end{aligned} \quad (19)$$

$$h = \Delta x^T \left(WBW^T - \frac{1}{2}\dot{M}_0 + S_0(x, \dot{x}) - \dot{W}MW^T \right) \dot{x} - \dot{x}^T(WMW^T + M_0)\dot{x} \quad (20)$$

$$\Gamma = W(W^+ - \hat{W}^+),$$

$$\delta_1 = \begin{bmatrix} W \\ \alpha W \end{bmatrix} \delta,$$

$$z = [\dot{x}^T, \Delta x^T]^T \quad (21)$$

$$\delta_{wp} = W^+ - \hat{W}^+, \quad \delta_g = g_0 - \hat{g}_0$$

$$\delta = \delta_{Jm} k_d + \delta_{wp} g_0 + \hat{W}^+ \delta_g \quad (22)$$

式 (19) より

$$\begin{aligned}
-\frac{dV}{dt} \geq & (\lambda_{\min}[K_v + WBW^T] - p_1 b_W \lambda_{\max}[K_v]) \|\dot{x}\|^2 \\
& + \alpha(\lambda_{\min}[K_p] - p_1 b_W \lambda_{\max}[K_p]) \|\Delta x\|^2 \\
& - p_1 b_W (\lambda_{\max}[K_p] + \alpha \lambda_{\max}[K_v]) \|\dot{x}\| \|\Delta x\| \\
& - \alpha \|h\| - \|z\| \|\delta_1\| \quad (23)
\end{aligned}$$

上式において b_W は W のノルムとする．ところでワイヤ行列 W を構成するワイヤベクトル w_i は $\sin$, $\cos$ の三角関数でできており有界である．さらに，位置変化 Δx は Vector Closure 内でのみ動作することとすれば有界となる．そこで，次式を満たす定数 c_0, c_1 が存在する．

$$\alpha \|h\| \leq \alpha c_0 \|\dot{x}\|^2 + \alpha c_1 \|\Delta x\|^2 \quad (24)$$

また，

$$-\frac{1}{2}(\|\dot{x}\|^2 + \|\Delta x\|^2) \leq -\|\Delta x\| \|\dot{x}\| \quad (25)$$

であるから，結局次式を得る．

$$\begin{aligned}
-\frac{dV}{dt} \geq & (\lambda_{\min}[K_v]k_1 - \alpha c_0) \|\dot{x}\|^2 \\
& + (\alpha \lambda_{\min}[K_p]k_2 - \alpha c_1) \|\Delta x\|^2 - \|z\| \|\delta_1\| \quad (26)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
k_1 = 1 + & \frac{\lambda_{\min}[WBW^T]}{\lambda_{\min}[K_v]} \\
& - p_1 b_W \left(\frac{\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right) \lambda_{\max}[K_v]}{\lambda_{\min}[K_v]} + \frac{\lambda_{\max}[K_p]}{2\lambda_{\min}[K_v]} \right) \quad (27)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
k_2 = 1 - p_1 b_W \left(\frac{\left(1 + \frac{1}{2\alpha}\right) \lambda_{\max}[K_p]}{\lambda_{\min}[K_p]} + \frac{\lambda_{\max}[K_v]}{2\lambda_{\min}[K_p]} \right) \quad (28)
\end{aligned}$$

式(26)において，ワイヤ疑似逆行列 W^+ の推定値と真値との誤差ノルム p_1 が

$$\begin{aligned}
p_1 < & \frac{1 + \frac{\lambda_{\min}[WBW^T]}{\lambda_{\min}[K_v]}}{b_W \left(\frac{\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right) \lambda_{\max}[K_v]}{\lambda_{\min}[K_v]} + \frac{\lambda_{\max}[K_p]}{2\lambda_{\min}[K_v]} \right)} \quad (29)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
p_1 < & \frac{1}{b_W \left(\frac{\left(1 + \frac{1}{2\alpha}\right) \lambda_{\max}[K_p]}{\lambda_{\min}[K_p]} + \frac{\lambda_{\max}[K_v]}{2\lambda_{\min}[K_p]} \right)} \quad (30)
\end{aligned}$$

の2式を同時に満足する大きさを持てば， $k_1 > 0$ かつ $k_2 > 0$ となる．したがって，十分大きなフィードバックゲイン K_p, K_v によって

$$\lambda_{\min}[K_v]k_1 - \alpha c_0 > 0, \quad \alpha \lambda_{\min}[K_p]k_2 - \alpha c_1 > 0 \quad (31)$$

とすることができ，次式を得る．

$$-\frac{dV}{dt} \geq l \|z\|^2 - \|z\| \|\delta_1\| \quad (32)$$

ここに

$$l = \min(\lambda_{\min}[K_v]k_1 - \alpha c_0, \alpha \lambda_{\min}[K_p]k_2 - \alpha c_1) \quad (33)$$

とする．結局，もし

$$\|z\| > \frac{\|\delta_1\|}{l} \quad (34)$$

の場合は $\frac{dV}{dt} < 0$ より，リアプノフ関数は減少する．よって状態量 $\|z\|$ は減少する．しかしながら $\|z\|$ が減少して，

$$\|z\| < \frac{\|\delta_1\|}{l} \quad (35)$$

となると， $\frac{dV}{dt} > 0$ となることもあり得るが，そのとき V は増加し，状態量 $\|z\|$ も増加する．増加した状態量が式(34)を満たすと， $\|z\|$ は再び減少する．したがって終局的有界性が主張でき，システムはある領域にとどまることが示される．ここで式(32)より，誤差がゼロの場合は δ_1 がゼロとなり目標位置へ収束する．また，フィードバックゲインの増加が誤差を減少させることも理解できる．

5. 4本ワイヤロボットによる実験

5.1 4本ワイヤ3自由度ロボット

前章では，作業座標系制御のロバスト性が終局有界という形で示された．しかし，他のこの種の証明方法と同様に，前章での結果の式(29)(30)は十分条件として厳しすぎるとも考えられる．すなわち，式(29)(30)を満足しなくとも，実際には安定性が保証できることも予想される．そこで，本章では簡単な実験システムによって実用上のロバスト性を明らかにする．

4本ワイヤを用いた平面3自由度ロボットを用い，パラレルワイヤ駆動システムの作業座標系制御法の実験を行った．4本ワイヤ3自由度ロボットの概要を **Fig. 2** に示す．このロボットは X-Y 平面内の回転と並進の3自由度を制御可能である．制御対象物である長方形の金属プレートには上・下端の2点から放射状に各点2本ずつ，計4本のワイヤが張られている．金属プレートのワイヤ端点間は50[mm]であり，各ワイヤはガイ

Fig. 2 4 wires robot system

Fig. 3 4 wires robot with 3 D.O.F.

ドプリーを介してアクチュエータ内のプリーによって巻き取られている。アクチュエータはギア（ギア比 1:4）、60[W] モータ、内径 45[mm] のプリーで構成されている。Fig. 3 に示すように、制御平面内のガイドプリーは一边を 350[mm] とする正方形の各頂点に位置する。ガイドプリーは鉛直軸に自由に回転し、ワイヤの方向に追従する。ガイドプリーの首振りに対して、X-Y 平面上におけるワイヤ出口は常に一定に保たれてワイヤは常に X-Y 平面上にあるように設計されている。

外界センサとしては株式会社応用計測研究所（OKK INC.）の Quick MAG システムを用いている。Quick MAG システムは 2 台のカメラによって計測対象物の三次元計測が可能であり、Quick MAG 制御用コンピュータの出力によってロボット制御用コンピュータに計測位置が転送される。4 本ワイヤロボットシステムでは制御対象物に 2 点の位置計測用のマーカーを配置し、リアルタイムでマーカー 2 点の三次元計測を行う。2 点の値はロボット制御用コンピュータに取り込まれる、この際、2 点の鉛直方向（Z 軸）の位置データは用いず、X-Y 平面内のデータだけを用いて制御対象物の位置姿勢 (x, y, θ) が計算されることとなる。本システムの Quick MAG の分解能は 0.3[mm] 程度である。

5.2 位置制御実験

ここでは以下のワイヤ疑似逆行列を用いて作業座標系による位置制御を試みた。なお、実験では水平面内の運動であるので、すべての場合について重力補償項は利用していない。

W^+ ：真値ワイヤ疑似逆行列

外界センサによって、制御対象物の位置姿勢が計測され、正しいと思われるワイヤ行列によって制御入力式 (5) を与えられる場合の位置制御である。釣り合い内力はリアルタイムで計測された物体の位置姿勢から実時間で更新している。

$\hat{W}^+$ ：推定ワイヤ疑似逆行列

アクチュエータ位置に誤差を含む場合の位置制御とする。今回は Table 1 に示すようにワイヤ出口の真値に対して、意図的にワイヤ行列に誤差を与えた。釣り合い内力は式 (13) のように、目標位置での推定値から算出される推定釣り合い内力を与えている。

W_c^+ ：定数ワイヤ疑似逆行列

リアルタイムにワイヤ行列を更新せず、ワイヤ行列を初期状態で与えられた定数として位置制御を行う。定数のワイヤ疑似逆行列 W_c^+ を用いる利点としては、ソフトウェアの簡略化が上げられる。

Table 1 Coordinates of wire exit points (X,Y)

	0	1	2	3
Correct	0,0 [mm]	350,0 [mm]	350,350 [mm]	0,350 [mm]
Estimated	0,70 [mm]	280,0 [mm]	350,280 [mm]	70,350 [mm]

Table 2 Steady-state errors of position experiments

	①		②		③	
	Vector Closure		Vicinity of boundary		Boundary of V.C.	
	PD	PID	PD	PID	PD	PID
W^+	1.5 [mm]	0.4 [mm]	2.3 [mm]	0.4 [mm]	2.5 [mm]	2.5 [mm]
$\hat{W}^+$	1.6 [mm]	0.5 [mm]	2.8 [mm]	1.1 [mm]	3.7 [mm]	3.2 [mm]
W_c^+	1.7 [mm]	0.6 [mm]	2.1 [mm]	1.0 [mm]	3.0 [mm]	3.0 [mm]
W^T	2.1 [mm]	0.8 [mm]	2.1 [mm]	0.9 [mm]	4.3 [mm]	3.5 [mm]

W^T ：ワイヤ転置行列

ワイヤ行列の疑似逆行列が $R^{m \times n_0}$ であるのに注目し、疑似逆行列 W^+ の代わりに転置行列 W^T を用いる。これは W^T を W^+ の推定量として与える方法である。定数ワイヤ疑似逆行列と同様、ソフトウェアの簡略化の面で利点がある。

本実験では上記 4 種類のワイヤ行列を用いた制御法に対し、(175,175,0) を初期状態とし以下の三つの目標位置に対してそれぞれ PD 制御と PID 制御を行った。

① Vector Closure 内

(105,175,0)：Vector Closure の境界条件から十分遠い目標位置

② Vector Closure 境界線近傍

(30,175,0)：Vector Closure の境界条件近傍の目標位置

③ Vector Closure 境界線上

(0,175,0)：Vector Closure の境界線上の目標位置

以上に示される制御方法、初期位置、目標位置においては、式 (29) (30) で与えられるパラメータ p_1 は、式 (14) で与えられる実際のワイヤ行列の誤差の 10 分の 1 程度となっている。すなわち、理論的に保証できる範囲よりも 10 倍大きな誤差を与えている。

本システムのように最少ワイヤ本数 $n+1$ 本を用いて制御を行う場合は、釣り合い内力ベクトルの各成分比率は一定であり、ベクトルの大きさのみ変更可能である [8]。Vector Closure の境界線やその近傍では釣り合い内力が現実では実現できないような極端に大きな値となる可能性がある。そこで本実験では、釣り合い内力の各ワイヤ成分がある値以上にならないように、内力ベクトルの係数を与えている。Vector Closure 境界線上における釣り合い内力は、Fig. 3 の 0 番目、3 番目のアクチュエータに通じるワイヤに対して同じゼロ以外の適当な張力を与え、1 番目、2 番目のワイヤ張力を 0 [N] に設定した。なお、フィードバックゲインの値は通常の PD、PID 制御のチューニング方法により決定した。

それぞれの実験の定常状態での位置誤差を Table 2 に示す。PD 制御を用いた場合では、Vector Closure 内で 1.5～2.1[mm]、境界線近傍で 2.1～2.8[mm]、境界線上では 2.5～4.3[mm] の定常偏差が確認された。誤差の主な原因は疑似逆行列や釣り合い内力の誤差量と摩擦であると考えられる。これに対し、本論文では理論的に収束性を証明していないが、積分

Fig. 4 Trajectory on W^+ PID control Fig. 6 Trajectory on W_c^+ PID control Fig. 5 Trajectory on $\dot{W}^+$ PID control Fig. 7 Trajectory on W^T PID control

項を加えた PID 制御の場合では定常偏差が減少され, Vector Closure 内で $0.4 \sim 0.8$ [mm], 境界線近傍で $0.4 \sim 1.1$ [mm], 境界線上では $2.5 \sim 3.5$ [mm] となった. なお, 同一実験システムで, 従来用いたワイヤ座標系制御法 [8] を利用した場合では, 作業座標系制御法の場合と比較して外界センサの計測で 2~5 倍程度の位置誤差となったことを報告しておく.

また, 目標値を $(30, 175, 0)$ とした場合の各ワイヤ行列の PID 制御における対象物の軌道を Fig. 4~7 に示す. 誤差を含むワイヤ行列を用いる場合では, 理論では式 (34) (35) のように状態量がある値の範囲内に収束することは証明しているが, 手先位置が静止することまでは保証していない. しかしながら, 実システムでは適当な値に収束している. また, 目標位置近傍までは, 高速に運動していることが実験結果からわかる. 一方で, I 動作によって位置精度を高めるために, 多くの時間を費やしている. したがって, 位置精度と速度の利用目的によって使い分ける必要があるだろう.

本実験ではシンプルなケースとして重力補償項を必要としない例を取り扱い, その誤差について言及した. しかし, 重力の影響が大きい系については, ワイヤの弾性要素が無視できなくなるなどの理由から, 系の挙動が不安定になる場合も考えられる. それらの実験結果については別の機会に報告する.

5.3 力制御実験

ワイヤ行列はワイヤ張力空間を手先力空間に変換する. したがって制御入力を次式にすることでフィードフォワードの力制御への拡張が可能となる.

$$\tau = W^+ (f_d + g_0) + v \quad (36)$$

Fig. 8 Experimental results of force control (X axis)

f_d は手先目標力とし, 一定値とする. 位置制御実験と同様のシステムを用いて力制御実験を行った. Fig. 8, 9 の○印にフィードフォワード入力の実験結果を示す. ここでは手先座標 $(175, 175, 0)$ において, x, y 方向にそれぞれ力制御を行ったものである. 各方向とも目標力には達していない. これも, アクチュエータやガイドブリーの摺動部の摩擦が主な原因と考えられる. そこで, 同様の実験を式 (37) のようにフィードバックを含めた力制御実験を行った. K_f はフィードバックゲインである. Fig. 8, 9 の●印にフィードバックとフィードフォワード併用の実験結果を示す.

$$\tau = W^+ (K_f (f_d - f) + f_d + g_0) + v \quad (37)$$

フィードフォワードの力制御に比べ, 精度の良い制御が可能と

Fig. 9 Experimental results of force control (Y axis)

なっていることがわかる。しかしながら、y 方向の目標力 30 [N] では偏差が大きく存在する。これはモータの飽和が原因であると考えられる。

6. お わ り に

本報告ではパラレルワイヤ駆動システムにおける作業座標系制御法について、ワイヤ行列 W の擬似逆行列 W^+ を用いた制御法を提案し、以下のことを明らかにした。

- ワイヤ行列が正しく計測される場合について、リアプノフの方法により安定解析を行い、手先が目標位置に収束することを示した。
- ワイヤ行列に誤差を含む場合について、リアプノフの方法によりロバスト性を示し、状態量の終局的有界性を示した。また、外界センサを利用し、4 本ワイヤ平面 3 自由度ロボットを用いて提案する作業座標系制御法の実験を行い、以下のことを示した。
- ワイヤ擬似逆行列が真値、推定値、定数、ワイヤ転置行列の場合について PD 位置制御を行い、目標値が Vector Closure 内では、誤差が 1.5~2.1 [mm] 程度であることを確認した。また、PID 制御を用いることで誤差が 0.4~0.8 [mm] 程度に減少することを確認した。さらに、Vector Closure の境界線近傍や境界線上における位置精度を検証した。
- フィードバックとフィードフォワードの力制御を行い、フィードバックを用いた力制御ではモータ出力が飽和しない限り良好な制御が可能であることを確認した。

本論文で行った作業座標系のロバスト性解析では十分条件として理論的に保証している範囲は極めて狭いように思われる。そこで今回の推定ワイヤ行列を用いる実験では意図的に大きな誤差を与えた。実験結果から、システムはワイヤ擬似逆行列の誤差に対して非常にロバストであることが示された。それ故、理論的に厳密に補償できる範囲を現実に近いことが今後の課

題の一つである。また、証明では PD 制御の解析しか行っていないが、PID 制御については参考文献 [11] のように外乱項を定数とすれば同様の証明ができると考えられ、今回は紙面の都合で割愛した。

実際にパラレルワイヤ駆動の大型システムなどに作業座標系制御を用いる場合ではワイヤ出口の座標に誤差が含まれる状態でも、ワイヤの方向ベクトルに今回の実験のような極端に大きな誤差を含むことは考えにくい。したがって他の実システムでも精度の良い位置制御が可能であると思われる。また、場合によってはワイヤ擬似逆行列 W^T を用いず、定数ワイヤ擬似逆行列 W_c^T やワイヤ転置行列 W^T を用いることによってソフトウェアを簡略化できることが、実験結果から示された。これらの実用的意義は大きいと考えられる。

本論文では、解析を簡単にするためにワイヤ駆動系には弾性要素がないとして取り扱った。しかしながら、実際には非線型剛性を有しており [6]、今後はワイヤの弾性要素を考慮したシステムについての解析を行う必要がある。

参 考 文 献

- [1] V.D. Nguyen: "Constructing Force-Closure Grasp in 3D," Proc. of the 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.240-245, 1987.
- [2] 樋口俊郎, 明愛国: "ワイヤ駆動を利用したスタッカークレーンの開発—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.
- [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] 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.
- [6] 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.
- [7] H. Kino, H. Miyazono, C. Won and S. Kawamura: "Realization of Large Work Space using Parallel Wire Drive Robots," 2nd Asian Control Conference, vol.3, pp.591-594, 1997.
- [8] 川村貞夫, 木野仁, 崔源, 勝田兼: "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", 日本ロボット学会誌, vol.16, no.4, pp.546-552, 1998.
- [9] 有本卓: ロボットの力学と制御, 朝倉書店, 1991.
- [10] 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.
- [11] S. Arimoto: Control Theory of Non-linear Mechanical Systems. CLARENDON PRESS OXFORD, 1996.
- [12] C.C. Cheah, H.Y. Han, S. Kawamura and S. Arimoto: "Grasping and Position Control for Multi-fingered Robot Hands with Uncertain Jacobian Matrices," pp.2403-2408, IEEE, R&A Proceedings, 1998.

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修士課程修了。同年同大学大学院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勤務。パラレルメカニズム、医療福祉ロボットなどに興味を持つ。
(日本ロボット学会正会員)

Chien Chern Cheah

received the Ph.D. in Electrical Engineering from Nanyang Technological University, Singapore in 1996. He was a teaching assistant in the University from 1991 to 1996, and was a research fellow in Ritsumeikan University, Japan from 1996 to 1998. Presently, he is an assistant professor in the Nanyang Technological University.

有本 卓 (Suguru Arimoto)

1936年8月3日生。1959年京都大学理学部卒業・沖電気工業KK、東京大学助手、講師を経て1968年大阪大学基礎工学部助教授、1973年同教授、1988年東京大学工学部教授、1997年立命館大学理工学部ロボティクス学科教授となり現在に至る。工学博士。ロボティクス、制御理論、信号処理、情報理論の研究に従事。日本機械学会、情報処理学会、計測自動制御学会などの会員。IEEEのFellow会員。
(日本ロボット学会正会員)

矢部 茂 (Shigeru Yabe)

1976年3月2日生。1999年立命館大学理工学部機械工学科卒業。同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に入学。現在に至る。宇宙ロボットの開発に興味を持つ。

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)