ワイヤ張力の機械的拘束方向への干渉を利用した ワイヤ駆動システムの剛性増加法

木 野 仁^{*1} 矢 部 茂^{*2} 島 本 武 史^{*2} 川 村 貞 夫^{*2}

Stiffness Increase Method of Wire Driven Systems using Interference of Driving Directions and Mechanical Constraint Directions

Hitoshi Kino^{*1}, Sigeru Yabe^{*2}, Takeshi Shimamoto^{*2} and Sadao Kawamura^{*2}

Parallel wire driven systems have many advantages such as high speed and safety to humans. When the motion of the system is restricted less than 6 D.O.F., mechanical constraints are utilized to fix the unnecessary D.O.F. and the remained freedoms of the system are driven by the parallel wire mechanism. The mechanical constraints should be light for realization of high speed or safety to humans. As the results, the stiffness of the directions made by mechanical constraints decreases and oscillation occurs in many cases. In this paper, we propose a stiffness increase method basing on nonlinear stiffness of the mechanical constraints and the wire drive units. In the proposed method, interference of wire tension with mechanical constraints must be effectively used. In order to obtain an appropriate interference pattern, an algorithm to design wire directions is also proposed. Finally, the effectiveness of the proposed method is demonstrated through several experimental results.

Key Words: Wire Driven System, Mechanical Constraint, Stiffness

1. は じ め に

一般にワイヤ駆動は、可動部分の慣性を小さくできるので、高速運動の実現や人間との機械的親和性に優れている [1]~[5]。しかし、ワイヤ特有の問題もいくつか存在する。ワイヤや構造部分などから生じる低剛性が、大きな問題の一つである。筆者らはワイヤ駆動システムの剛性を増加し、高速運動停止時の振動抑制の目的で、7本ワイヤを用いた6自由度の平行ワイヤ駆動システムを提案し、内力によって剛性を増加させる方法を示している [4] [5]。この方法によれば、ワイヤの張力発生方向には、内力によって効果的に剛性を増加できることが実験的にも確認されている。

しかし、実際のアプリケーションでは、対象物体の6自由度すべてを制御する必要がない場合も多い。そのような場合には、不要な自由度を機械的に拘束して、必要な自由度をワイヤ駆動することになる。その際、ワイヤ駆動自由度には、前述の内力による剛性増加方法が利用できる。一方、機械的拘束方向には、振動抑制については検討されていない。これは、機械的拘束部には高精度な加工と組み立てと、十分な剛性が保証されている

と考えられていたためである。しかし、一般に工学的現実を考えると、より安価に簡便に製作されることが望ましい。さらに、高速運動や人間との機械的親和性の目的を強調するためには、機械的拘束自体も軽量とする必要がある。これに伴って、機械的拘束物体の機械的ガタや低剛性の問題が生じる。そこで本論文では、機械的拘束部の機械的ガタを減少させ、剛性を増加させる方法を検討する。本論文では以下、用語として、「剛性増加」を同じ値の力によって生じる変位を小さくする意味に用いる。

具体的には、多くの場合では機械拘束部に、2章で述べるような非線形剛性要素が存在することを利用し、ワイヤ張力を意図的に機械的拘束方向に干渉させ、システムの剛性を増加する方法を提案する。この方法ではワイヤの配置を工夫することで対象物の機械拘束自由度の振動抑制が可能であり、ワイヤ駆動系での新たな設計指針を与えることができる。本論文では、基本的な考え方と実用的な設計法を提案するとともに、簡単な実験により提案する方式の有効性を示す。

2. 基本概念と問題設定

2.1 変形と剛性増加

本論文で提案する設計方法の基本的アイデアを示す。Fig. 1(a) に示されてように、平面内を動く質点で表現される対象物体にはワイヤが連結されており、機械的拘束を利用して不要な自由度 (y 方向) を機械拘束しているとする。このとき、機械的拘束物体およびワイヤには、Fig. 2 に見られるような非

原稿受付 2000 年 11 月 24 日

^{*1}福岡工業大学工学部

^{*2}立命館大学理工学部

^{*1}Faculty of Engineering, Fukuoka Institute of Technology

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

Fig. 1 Basic concept

Fig. 2 Non-linear elasticity

線形な特性が存在すると仮定する。すなわち、変位の増加に伴って剛性が増加する特性である。実際のシステムにこのような特性があるかは、後の実験結果などから示すこととする。本論文では以後、Fig. 2 に示される機械的ガタを含む特性を非線型剛性特性と呼ぶ。Fig. 1 ではこの非線形特性をスプリングで表現している。そこで、Fig. 1 (b) のようにワイヤの張力方向を調節し、 y 方向に駆動を干渉させると、非線形剛性特性より、 y 方向の剛性が増加する。本論文では、この特性を利用して、ワイヤ駆動における機械拘束自由度の剛性増加方法を論じる。

もちろん、対象物体や機械的拘束に応力をかけた状態を作ることや、応力の増加・減少を繰り返すことが、対象物体や機械拘束物体の材料にどのように影響するかなども、実用上の問題となろう。ただし、本論文では、多自由度系に関する設計法に主眼を置き、この問題には触れないこととする。

2.2 システムに関する仮定

提案する剛性増加法を利用すれば、ワイヤ駆動システムの運動中も、高剛性を保てる可能性がある。しかし、議論を簡略化するために、運動停止時における振動を抑制することを目的とする。解析では以下の仮定を設ける。

- (1) ワイヤには幅がなく、ワイヤの張力発生方向回りのモーメントは考えない。
- (2) 対象物体の 6 自由度のうち、少なくとも 1 自由度は機械拘束されているとする。
- (3) 座標系の設定は、機械拘束方向と駆動方向が分離できるように行う。
- (4) 拘束面、拘束軸などの摩擦は無視できる。
- (5) 機械的拘束物体は完全剛体ではなく微小変形する。
- (6) 仮定 (5) の変形は、Fig. 2 に見られるような、変位の増加に伴って剛性が増加する非線形特性を有する。
- (7) 以下の論議ではワイヤ方向などの表現に座標系が利用される。ただし、拘束物体の変形から生じる座標系の変化は、

ワイヤ方向（力方向）の違いを論議するオーダーに対して無視できる大きさと考ええる。

- (8) 通常、剛性行列の非対角項が存在する。これらの項も仮定 (6) と同様の非線形性を有していると考えられる。しかし、ここでは議論を簡略化するために、剛性行列の対角成分のみの効果によって、剛性を増加させると考える。
- (9) 仮定 (7) とかかわって、本来、力方向が変化する場合は、ワイヤの内力による剛性効果が知られている [6]~[8]。しかし、力方向の変化が微小であるので、この効果は無視する。
- (10) アクチュエータは任意の力を発生可能とする。
- (11) 重力を含む外力による影響はないものとする。

3. 干渉ワイヤ配置による剛性増加法

3.1 空間定義と力学的関係式

効果的に機械拘束部の剛性増加を行うための、ワイヤ配置について考察する。説明の簡略化のために以下では多自由度系として完全拘束型のパラレルワイヤ駆動システム n ($n < 6$) 自由度を制御する場合を取り扱う。対象物体上には座標系が設置されており、対象物体の並進自由度 (x, y, z)、回転自由度 (α, β, γ) の計 6 自由度のうち、 k ($= 6 - n$) 自由度を機械拘束する。使用するワイヤ本数は最小ワイヤ本数 $n + 1$ 本とする。このとき、ワイヤ張力によって発生する力ベクトルを $f(6 \times 1)$ とすると、次式で与えられる。

$$f = W\alpha_t \quad (1)$$

$$W = [w_1 \cdots w_{n+1}] \quad (2)$$

$$w_i = \begin{bmatrix} p_i \\ c_i \times p_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_i \\ r_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここに、

$W \in R^{6 \times (n+1)}$: ワイヤ行列

$w_i \in R^6$: ワイヤ行列 W の i 番目の列ベクトル (ワイヤベクトル)

$p_i \in R^3$: i 番目ワイヤの方向単位ベクトル ($\|p_i\| = 1$)

$c_i \in R^3$: i 番目ワイヤの座標原点からワイヤ装着位置までのベクトル

$r_i = c_i \times p_i$: モーメントベクトル

$\alpha_t = [\alpha_{t1} \cdots \alpha_{t(n+1)}]^T$: ワイヤ張力ベクトル

α_{ti} : i 番目ワイヤの張力

とする。従来の研究 [5] では、この発生力 f がすべて駆動力である場合を扱っていた。ここではワイヤ張力からの発生力を駆動力と拘束力の両方に利用する。ただし、ワイヤは押すことができず、常に引っ張り方向にしか張力を発生できないので、ワイヤ張力ベクトル α_t は、 $\alpha_{ti} > 0$ ($1 \leq i \leq n + 1$) を常に満足しなければならない。

さて、ここで、駆動力と拘束力を明確にするために以下の考察を行う。駆動方向と拘束方向は、対象によって設計者があらかじめ決定する。このとき、前述の仮定 (3) より、機械拘束方向と駆動方向とが分離できるように座標系が設定されている。例えば、並進・回転の 6 自由度を $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)^T$ としたとき

に、 z, β, γ 方向を機械拘束するとすれば、機械拘束された各方向を基本ベクトルとした時に張る空間は $(x, y, 0, \alpha, 0, 0)^T$ 、各駆動方向によって張られる空間は $(0, 0, z, 0, \beta, \gamma)^T$ と表され、完全に分離できるものとする。したがってこれらの空間は互いに直交補空間となる。

ここで、駆動力ベクトル $\tau(n \times 1)$ と拘束力ベクトル $\xi(k \times 1)$ は次式で表す。

$$\tau = S_d W \alpha_t \quad (4)$$

$$\xi = S_c W \alpha_t \quad (5)$$

上式において、行列 $S_d(n \times 6)$ 、 $S_c(k \times 6)$ はそれぞれ、駆動方向、機械拘束方向の基本単位ベクトルを行に持つ行列である。これらの行列には、次の関係が成立している。

$$S_d^T S_d + S_c^T S_c = I \quad (6)$$

ただし、 I は 6×6 の単位行列である。前述の機械拘束例の場合では、

$$S_d = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$S_c = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

となる。式 (4)、式 (5)、式 (6) より、式 (1) は

$$f = S_d^T \tau + S_c^T \xi = (S_d^T S_d + S_c^T S_c) W \alpha_t = W \alpha_t \quad (7)$$

となっていることが理解される。ここで行列 $S_d W$ は発生力 τ に直接的に作用する駆動力を表している。したがって、行列 $S_d W$ は以下の Vector Closure の条件を常に満足しなければならない [10]。

V.C. 条件 1 $\text{Rank}(S_d W) = n$

V.C. 条件 2 次式を満たすベクトル $\beta_t = [\beta_{t1} \dots \beta_{t(n+1)}]^T$ が存在する。

$$S_d W \beta_t = 0 \quad (8)$$

ただし、 $\beta_{ti} > 0$ (for any i) または $\beta_{ti} < 0$ (for any i)

一方、式 (5) の行列 $S_c W$ の働きについては、従来考えられていなかった。そこで、本論文ではこの部分を剛性の増加に利用する。前述した仮定より、式 (5) の拘束力ベクトル ξ の非零値を有する自由度には、ワイヤ張力が機械拘束自由度に干渉力を与えていることを意味し、非線形剛性特性より、その自由度の剛性が増加できることを意味する。また、成分の絶対値が大きいほど、高い剛性効果を得ることができる。

3.2 ワイヤ配置の考察

3.2.1 すべての拘束方向に力を発生するワイヤベクトルの条件

ここでは、機械拘束自由度のすべての剛性を増加させるワイヤベクトルについて検討する。対象物体は位置姿勢を与えられ、かつ、静止した状態であるとし、各ワイヤの対象物との接点、およびワイヤ方向は自由に決定できるとする。これは、実システ

Fig. 3 Constrained wire driven system

ムにおいて、アクチュエータの配置を自由に決定できることを意味する。すなわち、前述の V.C. の条件を満足する限りは残った行列 W の要素は自由に設定できるとする。

機械的拘束の剛性を増加させるためには、拘束力を発生させればよい。すべての拘束方向に力を発生させるためには、ワイヤ張力ベクトル α_t の各要素は正であるので、行列 $S_c W$ の各行ベクトルに、ゼロでない要素が存在し、かつ、その符号が各行について同じであれば、要素間の相殺が起こらず、すべての拘束力方向に拘束力を与えることができる。実際には、対象物体の運動と共に、ワイヤの方向が変化する。これによって行列 W の要素の値も変わるので、一般には運動範囲のすべてについて符号をチェックする必要がある。また、必ずしも各行についての符号が同一でない場合でも、行列 $S_c W$ のゼロ空間に属さないように張力 α_t を調整することができる。しかし、ワイヤベクトルの変化や張力の大きさに依存して、拘束力発生の可能性が決定されるので、一般的に論議することは難しい。また、同じワイヤ配置でも目標駆動力 τ_d を実現するために張力ベクトルを変化させると、 ξ の値の大小に影響を及ぼす。しかし、ここでは拘束方向に力を発生できるかを定量的にのみ論じることとする。そこで、ここでは以下の十分条件を与える。

すべての機械拘束方向の剛性を増加させるワイヤ配置十分条件

式 (5) の行列 $S_c W$ の各行ベクトルに、ゼロでない要素が存在し、しかも、その要素の符号が各行について同じである。

3.2.2 実用的なワイヤ配置設計法

前項では、すべての拘束方向に剛性増加の条件を与えた。しかし、この条件を満足できる解が、一般の多くの対象で存在する保証はない。一方、実用的観点からは必ずしも、すべての拘束方向に拘束力を発しなくともよい場合が多い。例えば、Fig. 3 に示されるように、制御対象物体がロッド形状などで機械拘束部と手先位置に距離があるときには、機械拘束された自由度のうち、特に α 方向の低剛性より生じる振動現象は手先位置で増大されるため、手先の情報に基づくフィードバックではシステムが不安定に陥る可能性がある。このような場合、 α 方向の剛性を増加させるだけで、十分な効果を得られる場合が多い。それゆえ、拘束自由度のうち限定された自由度のみについて、提案する方法によって剛性を増加させることも有効となる。そこで、本項では限定された拘束自由度について有効なワイヤ配置

を求めるアルゴリズムを提案する。

まず、限定される自由度を以下のように記述する。式 (5) の拘束力 $\xi(k \times 1)$ より注目する拘束力 $\hat{\xi}(m \times 1)$ を選定する。ただし、 $m \leq k$ である。行列 $S_c(k \times 6)$ と同様に必要な自由度のみに 1 の要素をもつ行ベクトルによって行列 $S_m(m \times k)$ を作り、以下を得る。

$$\hat{\xi} = S_m \xi = S_m S_c W \alpha_t = W_c \alpha_t \quad (9)$$

ただし、 $W_c = S_m S_c W$ とする。これと対応して、駆動自由度についても

$$\tau = S_d W \alpha_t = W_d \alpha_t \quad (10)$$

$$W_d = S_d W \quad (11)$$

としておく。適切なワイヤ配置を求めるために以下のアルゴリズムを提案する。

アルゴリズム

- (1) 機械拘束された対象物体の位置姿勢を一つ定める。
- (2) 駆動部とベースを適当な刻み幅によって空間を分割し、各点をワイヤ端点位置の候補する。
- (3) 駆動部の一つのワイヤ端候補と、ベース部の一つのワイヤ端候補を結んだ直線をワイヤ候補の一つとする。また、 $n+1$ 個のワイヤ候補を一組のワイヤ配置候補とする。
- (4) 前の (3) のワイヤ候補に関して、駆動力自由度について **Vector Closure** 条件をチェックする。
- (5) 行列 W_c の各行について、以下を成立することをチェックする。
 - (a) 少なくとも一つはゼロでない要素が存在する。
 - (b) ゼロでない要素はすべて同一符号を持つ。
- (6) ワイヤ端点の各候補について、(3)~(5) の手順を繰り返す。
- (7) 以上のチェックを可動範囲すべてに対して行い、ワイヤ配置の解を求める。

上述したアルゴリズムでは、複数のワイヤ配置解が存在する可能性がある。複数のワイヤ配置解が得られた場合では、システムに適するワイヤ配置解を絞り込み、最終的に一つに決定しなければならない。その際には各ワイヤの外界との干渉や可動範囲、手先剛性などの評価が基準となる。しかしながら、現時点ではこれらの基準に対し、総合的な評価関数を決定することはきわめて困難である。したがって、最終的なワイヤ配置解の絞り込みは、個々の目的に応じて行うものとする。

次に Fig. 3 の例について、このアルゴリズムに基づいて、ワイヤ配置を決定してみよう。制御対象物体は Fig. 3 に示されるようにロッド形状とし、ロッドの片端は機械拘束部材を介してベース部に固定されている。また、もう一方の片端にはエンドエフェクタを装着することを想定する。ただし、パラレルワイヤ駆動システムの特性を生かし、高速運動性や人間親和性を重視するために、軽量のロッドを使用する。ワイヤは 2 本とし、駆動自由度は β 回転の 1 自由度、残りの自由度のすべてが機械拘束されている。本例では回転 α 、 γ に関して有効なワイヤ配置を求めることとする。 γ 回転は、問題とならない場合も多い。しかし、本研究では、2 リンク以上をシリアルに連結することもあると考えているので [11]、その際には γ 回転の変形も位置精度に

Fig. 4 Candidates of wire points

Fig. 5 Candidates of wire location

大きく影響する。そのために、ここでは、 α と γ 回転を対象とする。

- アルゴリズム (1) より、ベース部平面 ($x-y$) に関してロッドが垂直で静止した状態を考える (Fig. 4)。
- 次にワイヤ端点の位置候補を決定する (アルゴリズム (2))。この場合では、軽量ロッドを使用し、ロッド端 A にエンドエフェクタを装着することを想定している。そこで、手先 A での剛性を高くするために、Fig. 4 に示されるように、対象物に結合させるワイヤ端の候補をロッド端 A に集中させる。したがって、ここでは、円柱縁上の 8 点を候補とした。一方、ワイヤと外界との干渉する空間を極力少なくするためと可動範囲を広くするために、ワイヤ配置を凸形状としたい。そこで、ベース部のワイヤ出口に候補については、ロッドを中心としたベース上の円を $\pi/4$ 刻みで分割し、円周上の 8 点とした。ただし、ベース上の円の半径はロッド長さと同じとした。
- 2 本のワイヤ候補をワイヤ配置候補とし、すべてのワイヤ配置候補について、アルゴリズム (4), (5) をチェックし、すべての条件を満足するものを解とする。

この場合のアルゴリズムより得られたワイヤ配置の解は、一意ではなく複数存在する。ワイヤ配置の解の例を、Fig. 5 に示す。Fig. 5 ではロッド上部 A 端から原点方向にワイヤ端候補を投影した図である。

4. 剛性増加実験

4.1 1 自由度 2 本ワイヤ実験装置

前章の例で取り扱った 1 自由度 2 本ワイヤシステムを用いて、提案する剛性増加法について実験を行った。実験システムは Fig. 6 に示されるように、ステンレス製のロッド、ワイヤ、アクチュエータ、機械拘束部、ベース部から構成される。制御対象

Fig. 6 Experimental system

Fig. 7 Mechanical constraint

Fig. 8 Actuator

物体であるロッドは外径 10 [mm]、内径 8 [mm]、長さ 500 [mm] を有した中空丸棒を用いている。片方の端が機械拘束されており、もう片端にはワイヤ 2 本が結合している。機械拘束部には軽量化を図るために Fig. 7 に示されるように 1 軸の回転機構を有した機械部材を使用しており、ロッドは拘束軸を中心に β 方向の回転 1 自由度の制御が可能である。機械拘束部材は株式会社ミスミ製アルミ蝶番 (AHS8040-4) を用いた。材質は軸部 ($\phi 5$ [mm]) は SMC435 相当の材質、プレート部の材質はアルミ合金ダイカスト 12 種である。なお、Fig. 7 の右図は株式会社ミスミのご好意による。アクチュエータは Fig. 8 のように、巻き取りプーリ、小型ガイドプーリ、DC サーボモタから成る。DC サーボモタは 60 [W] の出力を有し、エンコーダを付属している。ワイヤは直径 1 [mm] のステンレス製を使用している。

実験システムは対象物体の 6 自由度のうち、 x , y , z , α , γ の自由度を機械拘束し、 β 回転を制御する。

4.2 実験結果

4.2.1 静的剛性増加実験

はじめに、 α , γ 方向の剛性増加実験ををそれぞれ別々に行う。

Fig. 9 Wires locations for α experiments Fig. 10 Wires locations for γ experiments

α 方向の剛性実験に関しては Fig. 9 (α -a)–(α -c) に示される 3 種類のワイヤ配置を準備した。ただし、ロッド先端 A のワイヤ配置は常に γ 方向に干渉力を生じないようにしてある (γ -a)。Fig. 9 (α -a) ではワイヤの駆動が α 方向に干渉のない状態であり、(α -b) では正方向に干渉、(α -c) では負方向に干渉した配置である。この三つのワイヤ配置について、 α 方向に負荷トルクを与え、レーザー変位計を用いて手先部 A の変位を測定し、点 A の微小変位から α の回転変位に変換する。

また、 γ の剛性実験に関しては、ロッド先端 A のワイヤ配置について、Fig. 10 (γ -a)–(γ -c) の 3 種類を準備した。このとき、 α 方向には干渉力を生じさせていない (α -a)。先の実験同様、(γ -a) ではワイヤの駆動が γ 方向に干渉無し、(γ -b) では正方向に干渉、(γ -c) では負方向に干渉した配置である。この三つのワイヤ配置について、 γ 方向に負荷トルクを与え、ポテンシオメータを用いて、手先位置 A での回転 γ の変位を測定する。

剛性増加実験の予備実験として、ロッド単体の剛性特性とロッドに機械拘束部材を付加した状態での α および γ 方向の剛性特性をそれぞれ調べた。この二つ実験ではロッド先端にワイヤを接続しておらず、張力を与えることができない。ロッド単体の実験では、機械拘束部材が接合する側の端をボルトにてベース部に固定している。予備実験では、ロッドを鉛直に静止させた状態を保ち、各方向に負荷トルクを与え、変位を測定した。負荷トルクは α 方向に関しては $0 \rightarrow -0.6 \rightarrow 0 \rightarrow 0.6 \rightarrow 0$ [Nm] と徐々に変化させ、 γ 方向については $0 \rightarrow -0.4 \rightarrow 0 \rightarrow 0.4 \rightarrow 0$ [Nm] と徐々に変化させた。これらの予備実験の α 方向の実験結果を Fig. 11 に、 γ 方向の実験結果を Fig. 12 に示す。ロッド自体の剛性に対し、機械拘束部材を付加した場合には、強い非線形特性が観測できる。特に α 方向の非線形特性は機械的ガタに大

Fig. 11 Preliminary experiments of α direction Fig. 12 Preliminary experiments of γ direction Fig. 13 Static experimental results of α (Fig. 9 System)

きく依存するものと推測される。

実際にワイヤを配置して行った剛性増加実験では、初めにワイヤに釣り合い内力 ($\alpha = (113.4 \text{ [N]}, 113.4 \text{ [N]})$) を与え、ロッドを鉛直に静止させた状態を保った。その後、各方向に負荷トルクを与え、変位を測定した。負荷トルクは α 方向に関しては $0 \rightarrow -0.6 \rightarrow 0 \rightarrow 0.6 \rightarrow 0 \text{ [Nm]}$ と徐々に変化させ、 γ 方向については $0 \rightarrow -0.4 \rightarrow 0 \rightarrow 0.4 \rightarrow 0 \text{ [Nm]}$ と徐々に変化させた。

α 方向の剛性実験結果を Fig. 13 に、 γ 方向の剛性増加実験を Fig. 14 に示す。なお、横軸に変位を、縦軸に負荷トルクを表している。実験結果から、駆動力を干渉させているワイヤ配置 (b), (c) の方が干渉のないワイヤ配置 (a) よりも剛性が増加し、ロッド自体の剛性特性に近づいているのが分かる。

次に、 α , γ 方向を同時に干渉させるワイヤ配置として、Fig. 15 のワイヤ配置を用いて、同様に静的な剛性増加実験を行った。ワイヤ配置は α 方向に負方向、 γ 方向に負方向の干渉力を与えている。これは前章で求めた、 α と γ 回転両方の剛性を増加させるためのワイヤ配置解の一つである (Fig. 5 (b))。このワイヤ配置について、 α 方向の剛性増加実験結果を Fig. 16 に、 γ 方向の剛性実験結果を Fig. 17 に示す。比較のために干渉力を与えていないワイヤ配置 (α -a, γ -a) も同時に示す。 α ,

Fig. 14 Static experimental results of γ (Fig. 10 System) Fig. 15 Wires location to increase α and γ stiffness Fig. 16 Static experimental results of α (Fig. 15 System) Fig. 17 Static experimental results of γ (Fig. 15 System)

γ 方向を同時に干渉させた場合でも先の実験同様、おのおのの方向について、効果的に剛性が増加していることが分かる。

4.2.2 動的振動抑制実験

本論文では、対象物が静止している状態での機械拘束自由度の剛性増加を論議してきた。しかしながら、実際には、持続的に大きなワイヤ張力を与えることで、動的にも類似の論議が可能と考えられる。そこで同実験システムを用いて動的剛性増加についても簡単な実験を行った。

動的実験では、Fig. 15 と同様のワイヤ配置を採用した。また、効果を比較することを目的として、駆動が α , γ 方向に干渉し

Fig. 18 Dynamic experimental results (Fig. 15 System)

ないワイヤ配置 (Fig. 9 (α -a, γ -a)) を同時に行った。本実験では、釣り合いワイヤ内力をリアルタイムで与えながら、 β 回転に対し、振幅 5 [deg]、周波数 5 [Hz] の sin 波形の目標軌道を与え、時変する目標位置に対し、ワイヤ長さをワイヤ座標系制御法 [12] によって制御した。計測は Fig. 6 のように PSD カメラを用い、ロッド先端 A の位置を y - z 平面に射影して測定した。横軸に時間を縦軸に y 方向の変位とした実験結果を Fig. 18 に示す。ロッド先端 A の y 方向は機械拘束されているため、本来変位は常にゼロであるが、 y , α 方向の弾性要素により振動が生じている。インパルス状のセンサノイズが観測されるものの、干渉させたワイヤ配置 (Fig. 15) の方が駆動が干渉しないワイヤ配置 (Fig. 9 (α -a, γ -a)) に比べて、振動が 50% 程度に抑制されているのが分かる。したがって、本論文で提案する剛性増加法は動的な場合でも、有効に作用し、振動抑制効果があることが確認された。

5. お わ り に

本論文では非線形剛性を持つ機械拘束を有するワイヤ駆動について、ワイヤ張力を拘束方向に干渉させることにより、機械拘束自由度の剛性を増加させる方法を提案した。また、力学的解析によりワイヤ配置決定法を示した。さらに、実際に 1 自由度システムを用いて、実験を行い提案方法の有用性を確かめた。

今回は剛性行列の対角成分のみの効果による剛性増加を論じた。しかし、機械拘束部材によっては、非対角成分も影響が十分大きく、干渉させる自由度よりも、同時に多くの自由度の剛

性を増加できる場合がある。また、本論文では干渉する力の方向のみにについて論議した。いわば干渉方向の定性的なチェックである。実際には定量的観点から効率のよいワイヤ配置を検討する必要がある。これらの問題は今後の課題としたい。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 本間敬子, 新井健生: "パラレルメカニズムを用いた上肢動作補助機構," 日本ロボット学会誌, vol.15, no.1, pp.90-96, 1997.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Z. Li, H. Chen, H. Kino, and S. Kawamura: "Effect of Internal Force on Stiffness of Antagonized rotational drive mechanism," Proc. of AMSA, pp.241-245, 2000.
- [7] W. Choe, H. Kino, K. Katsuta, and S. Kawamura: "A Design of Parallel Wire Driven Robots for Ultrahigh Speed Motion Based on Stiffness Analysis," Proc. of The JAPAN-USA Symposium on Flexible Automation, pp.159-166, 1996.
- [8] 花房, M.A. Adli: "閉じた機構の剛性に及ぼす内力の効果," 日本ロボット学会誌, vol.10, no.1, pp.128-134, 1992.
- [9] 山本元司, 柳井法貴, 毛利彰: "多自由度クレーン型マニピュレータの逆動力学計算と軌道制御," 日本ロボット学会誌, vol.17, no.7, pp.1037-1047, 1999.
- [10] V.D. Nguyen: "Constructing Force-Closure Grasp in 3D," Proc. of the 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.240-245, 1987.
- [11] 内倉義景, 木野仁, 川村貞夫: "パラレルワイヤ駆動型シリアルリンク構造ロボットの開発," 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, 1998.
- [12] 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.

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。96 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。97 年 3 月退学後、滋賀医科大学教務職員を経て、2001 年 4 月より福岡工業大学講師。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)

島本武史 (Takeshi Shimamoto)

1977 年 10 月 6 日生。2000 年立命館大学理工学部ロボティクス学科卒業。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。ヴァーチャルリアリティ、マスタースレーブシステムの開発に興味を持つ。

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。86 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。87 年立命館大学理工学部機械工学科助教授を経て、95 年同大学同学科教授。96 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)