

張力楕円体を考慮したワイヤ懸垂型マニピュレータの張力制御

Tension Control of a Wire Suspended Manipulator Considering Tension Ellipsoid

精密工学専攻 48号 松本 徹
Toru Matsumoto

1. 序論

マニピュレータはその高い作業性から、自動組み立て等多くの現場で自動化に貢献している。しかし通常、マニピュレータは床に固定して使用されるため、その作業範囲は自身の腕が届く範囲に限定されてしまう。そこで、より広範囲での作業に利用することを目的として、これまで、数々の移動型マニピュレータが開発されている。本研究では、6本のワイヤを利用した移動機構を採用する⁽¹⁾。空間の自由度は6であるからワイヤの数を6本とし、すべてを一次独立となるように配置すれば理論的には揺れない機構となる。またワイヤの長さを変化させることで、3次元空間の広範囲で移動が可能となる。

しかし、マニピュレータ動作により大きな反力が発生すると、いずれかのワイヤが弛み、不連続な振動を発生したり、マニピュレータが上向きに搭載されていた場合、ベースが転倒する恐れもある。そこで、齋藤ら⁽²⁾は、ベースに搭載するマニピュレータに冗長性を持たせ、マニピュレータの動作に伴いベースに発生する反力ができるだけワイヤ張力を小さくしないよう制御する手法を提案している。ただし、冗長自由度マニピュレータはコスト的に不利となること、冗長性が大きくない場合には効果が薄いことなどが問題となる。



Fig.1 Wire suspended redundant manipulator

そこで本研究では、6本のワイヤで懸垂されたベースにカウンタウェイト制御機構を取り付け、マニピュレータの動作に伴う反力を打ち消すことで、ワイヤ張力の変化を抑制する手法を提案する。本研究で開発されたベースを利用することで、どのようなマニピュレータが搭載されても安定した利用が可能となる。

2. ワイヤ懸垂型マニピュレータの概要

本研究で開発したワイヤ懸垂型マニピュレータを Fig.2 に示す。アルミ角材で構成された正方形のベースの4辺に、それぞれモータとボールねじで駆動されるカウンタウェイトが取り付けられている。6本のワイヤでベースを懸垂し、それぞれロードセルを利用した張力センサが取り付けられて

おり、すべてのワイヤ張力を計測することができる。これにより、懸垂部全体の重心位置の変化と、カウンタウェイトの慣性力を利用することで張力の制御が可能となる。

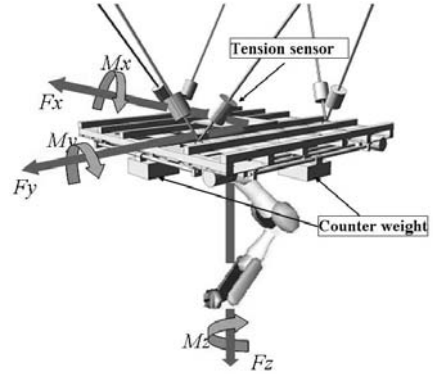


Fig.2 Wire suspended manipulator using counter-weight

3. ワイヤ懸垂型マニピュレータの特性解析

3.1 ワイヤ懸垂機構の運動学・静力学

ワイヤ懸垂機構として3-3のステュワートプラットフォームタイプを採用する⁽³⁾。Fig.3に示すモデルの上部プラットフォームをUpper Platform(UP)、下部プラットフォームをLower Platform(LP)とする。UP、LPの中心に、 x, y 軸が水平面となるよう、それぞれUP座標系 Σ_u 、LP座標系 Σ_L を設定する。 Σ_u を基準座標系とし、 Σ_L の原点位置ベクトル (x_L, y_L, z_L) 、及び姿勢ベクトル $(\phi_L, \theta_L, \psi_L)$ が与えられると、LPのワイヤ取り付け点も Σ_L の位置・姿勢6成分を用いて簡単に計算できる。よって、その位置・姿勢を実現するための6本のワイヤ長 $l_1 \sim l_6$ は、ワイヤは弛まない状態を仮定すれば、UPとLPのワイヤ取り付け点間の距離として簡単に算出できる。

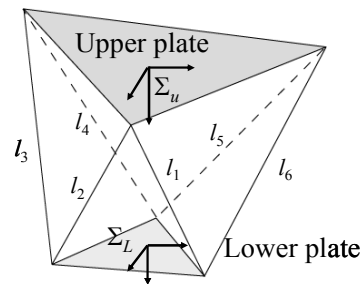


Fig.3 3-3 Geometry of Stewart platform

$$\mathbf{l} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_L) \quad (1)$$

ただし、

$$\mathbf{l} = [l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4 \ l_5 \ l_6]^T$$

$$\mathbf{x}_L = [x_L \ y_L \ z_L \ \phi_L \ \theta_L \ \psi_L]^T$$

である。式(1)の両辺を微分すると

$$\dot{\mathbf{i}} = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}_L)}{\partial \mathbf{x}_L} \dot{\mathbf{x}}_L = \mathbf{J}(\mathbf{x}_L) \dot{\mathbf{x}}_L \quad (2)$$

となる。ただし、 $\mathbf{J}(\mathbf{x}_L)$ はヤコビ行列である。さらに、運動学の式(2)から、懸垂ベースにかかる外力 \mathbf{F} とワイヤ張力 $\boldsymbol{\tau}$ の関係は

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}(\mathbf{x}_L)^T \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

ただし、

$$\mathbf{F} = [F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z]^T$$

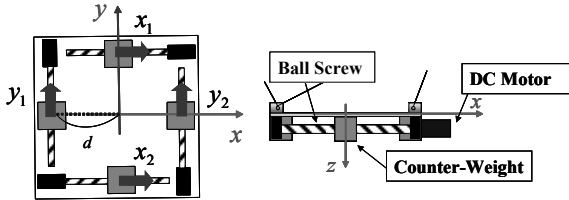
$$\boldsymbol{\tau} = [T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4 \ T_5 \ T_6]^T$$

と表わされる。ここで、 $T_i (i=1, 2 \dots 6)$ は各ワイヤ張力、 F_x, F_y, F_z は x, y, z 軸方向の並進外力、 M_x, M_y, M_z は x, y, z 軸を中心としたモーメントである。

式(3)より、6本のワイヤ張力がわかればその時のLPに対する外力ベクトルが求まる。また、両辺に $\mathbf{J}(\mathbf{x}_L)^T$ を掛ければ、カウンタウェイトが張力に対して及ぼす効果も計算できる。

3.2 カウンタウェイト動作の張力への影響

カウンタウェイトの駆動構造と二次元平面モデルを Fig.4 に示す。 x 軸方向に平行な位置関係にあるカウンタウェイトの位置を x_1, x_2 , y 軸方向に平行な位置関係にあるカウンタウェイトの位置を y_1, y_2 とする。カウンタウェイトの駆動によるワイヤ張力への影響は、懸垂ベースに付加される外力とみなすことができる。



(a)Bottom of base plate (b)Bottom of base in x-z plane

Fig.4 Base plate

カウンタウェイトを考慮したワイヤ張力と外力との関係は式(3)より

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}(\mathbf{x}_L)^T \begin{pmatrix} F_x + (m\ddot{x}_1 + m\ddot{x}_2) \\ F_y + (m\ddot{y}_1 + m\ddot{y}_2) \\ F_z - 4mg \\ M_x - (mgy_1 + mgy_2) \\ M_y - (mgx_1 + mgx_2) \\ M_z - md\ddot{x}_1 + md\ddot{x}_2 - md\ddot{y}_1 + md\ddot{y}_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

と表現できる。ただし、 d はベース中心からカウンタウェイトの動作軸までの距離、 m はカウンタウェイト質量、 g は重力加速度である。

これより、カウンタウェイトは、その位置で決定される静的効果として x, y 軸回りのモーメントを発生し、一方、加速度運動の反力で発生する動的効果として、 x, y 方向の並進力と、 z 軸周りのモーメントを発生することがわかる。

3.3 張力楕円体

次に、カウンタウェイトの発生する制御力が張力に及ぼす影響を、より直感的に表現するため、張力楕円体を提案する。なお、ここでは張力が正の値を保った状態でカウンタウェイトが張力に及ぼす影響を考察することを目的としているので、張力が正でなければならないことに対する不等式拘束は考慮しない。まず、LP座標系に外力として並進力3成分 F_x, F_y, F_z のみが発生するものとして、これと張力の関係を求める。式(3)より

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}(\mathbf{x}_L)^T \boldsymbol{\tau} = [\mathbf{J}_{FT} \ \mathbf{J}_{MT}]^T \boldsymbol{\tau} \quad (5)$$

とおくと、 M_x, M_y, M_z は0なので、 $\mathbf{J}_{MT} \boldsymbol{\tau} = 0$ が必要となる。

よって $\mathbf{F} = [\mathbf{f} \ \mathbf{m}]^T$ とすれば

$$\mathbf{f} = \mathbf{J}_{FT}(\mathbf{I} - \mathbf{J}_{MT}^+ \mathbf{J}_{MT}) \boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}_f \boldsymbol{\tau} \quad (6)$$

より、張力のノルムを1とする単位球は

$$\boldsymbol{\tau}^T \boldsymbol{\tau} = \mathbf{f}^T \mathbf{J}_f^{-T} \mathbf{J}_f^{-1} \mathbf{f} = \mathbf{f}^T (\mathbf{J}_f \mathbf{J}_f^T)^{-1} \mathbf{f} = 1 \quad (7)$$

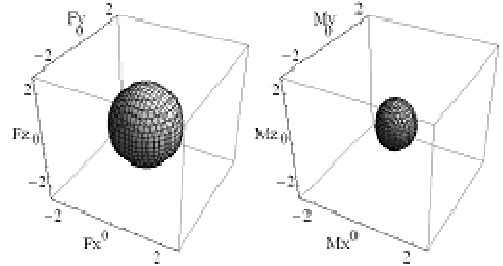
に変換される。よって、 $\mathbf{J}_f \mathbf{J}_f^T$ を特異値分解し式(7)の表わす楕円体を描けば、モーメントを0とした時の並進力と張力の関係を楕円体で表現することができる。同様に、並進力が0となる場合には

$$\mathbf{m} = \mathbf{J}_{MT}(\mathbf{I} - \mathbf{J}_{FT}^+ \mathbf{J}_{FT}) \boldsymbol{\tau} \quad (8)$$

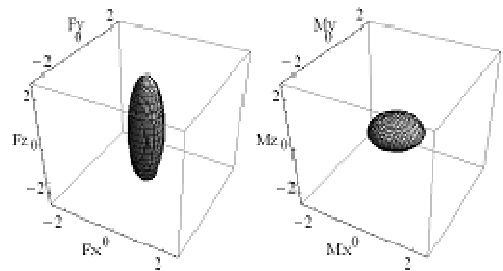
より、

$$\mathbf{J}_m = \mathbf{J}_{MT}(\mathbf{I} - \mathbf{J}_{FT}^+ \mathbf{J}_{FT}) \quad (9)$$

とし、 $\mathbf{J}_m \mathbf{J}_m^T$ を特異値分解すれば良い。



(1) L=0.985



(2) L=2.0

(a) Translational force (b) Moment

Fig.5 Tension Ellipsoid of operational ability

これらの楕円形状は、懸垂するワイヤのベースに対する角度に依存して変化する。これを図示したのが Fig.5 である。ただしUPのワイヤ取り付け点は半径0.8の円周上の三等分点、LPを半径0.6の円周上の三等分点とし、LPは水平とする。図の(1)と(2)は6本のワイヤ長 L がすべて、0.985m, 2.0m の場合である。Fig.5(1)はワイヤ角度が大きい場合で、ベース

が室内の上方にある場合に相当し、一方(2)は小さな場合で、これは室内下方に相当する。これらの楕円は、長軸方向には大きな外力に対してワイヤが反力を発生しやすく、逆に短軸方向には発生しにくいことを表している。つまり楕円の長軸方向に対しては外力に強いが、短軸方向には弱いといえる。(1)では、並進方向の力に対するワイヤ張力変化が比較的小さいのに対して、モーメントの変化に対しては影響が大きく、一方(2)では、逆に並進方向の力には弱く、モーメントの変化には強いことがわかる。

4. カウンタウェイトの制御計設計

カウンタウェイトの張力への影響は、その位置が移動することによる重心変化による静的な効果、カウンタウェイトが加速度運動をする際の反力による動的な効果の2つがある。5章で述べる実験装置と Fig.5(1)の楕円体を考慮すると重心変化による静的な効果のほうが大きいと言える。そこで、カウンタウェイトの目標位置を決定するために、最小二乗法を利用した制御方法を提案する。なお、計算を簡単にするため、 $x_1=x_2=x$, $y_1=y_2=y$ とする。

懸垂機構に自重のみが作用し、マニピュレータの腕が真下に伸びきった状態の各ワイヤ張力を基準張力 T_{si} とすると、 T_{si} と各ワイヤ張力 T_i の差の二乗和 S は

$$S = \sum_{i=1}^6 (T_{si} - T_i)^2 \quad (i = 1 \sim 6) \quad (10)$$

で表すことができる。この S を最小にすることで、各ワイヤ張力が基準張力 T_{si} に近づき全体のバランスを取ることができる。ここで T_i は式(4)よりカウンタウェイトの位置 x , y の関数で表されるので、

$$\frac{\partial S}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial S}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

として求めた x_m , y_m がカウンタウェイトの目標位置となる。なお、利用したモータ制御系は、その入力電圧と出力速度の関係が1次遅れ系で近似できる。そこで、モータへの印加電圧 u_{xt} は、単純に現在位置 x_t と目標位置 x_m との差にゲイン k_a をかけた式(12)とする。

$$u_{xt} = k_a \times (x_t - x_m) \quad (12)$$

5. 実験装置の構成

Fig.6 に本研究で使用するワイヤ懸垂型マニピュレータの実験機とその仕様を Table 1 に示す。本研究では、7自由度マニピュレータ(三菱重工業製 PA10)を用いる。各ワイヤに搭載した張力センサには昭和測器の DBS-1KN を用いる。定格容量は1kN、分解能は6.72Nとなっている。

6. 張力制御実験

制御の有効性を検証するため Fig.7 に示すような、 F_x と M_x の力を実験機に加えた場合のカウンタウェイト制御なし、制御ありの実験をそれぞれ行った。

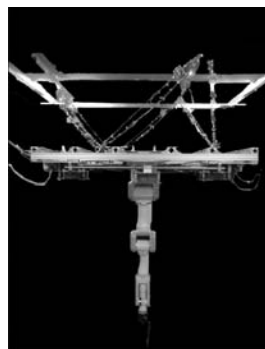


Fig.6 Wire suspended Manipulator

Table 1 Specifications of experimental system

OS	Windows XP
Sampling time	30[ms]
Counter weight mass	7.0[kg] × 4
Experimental plane of mass	150[kg]
Base size	1.4 × 1.4[m ²]
Number of wire	6
Wire length	0.985[m]
The shortest distance between origin of LP and upper wire fixed point	0.6[m]
The shortest distance between origin of LP and bottom wire fixed point	0.8[m]

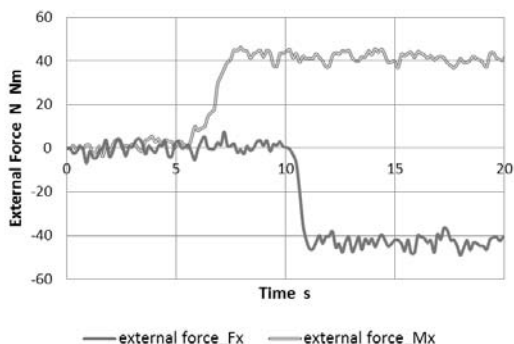


Fig.7 Input external force

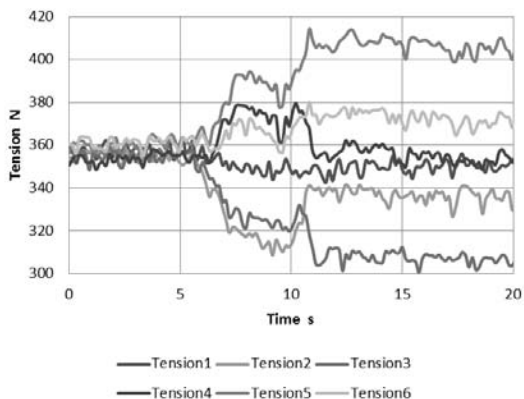


Fig.8 Uncontrolled wire tensions

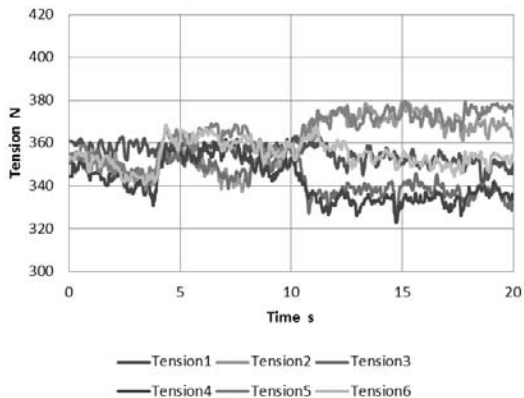


Fig.9 Controlled wire tensions

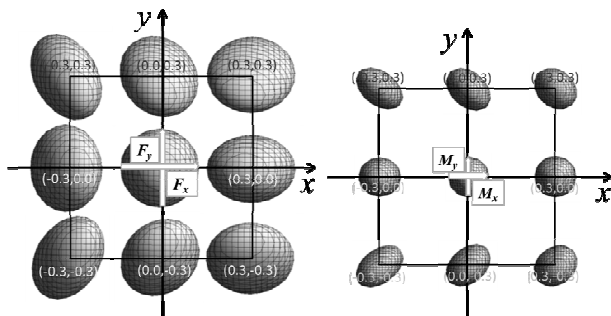
両者を比較すると、開始5秒で加わり始めた M_x に関しては制御を入れることで十分に抑えられていることがわかる。しかし、10秒から加わった F_x は完全に抑えることができていない。これは式(4)で示したように、並進方向の力をカウンタウェイトで発生させるには、加速度を使用しなければならないが、Fig.5(1)で示したように、今回使用した実験システムではモーメントのほうがより影響力があり、カウンタウェイトの位置の変化による影響のほうが効いてくるためである。

7. ベース位置変更時のシミュレーション

7.1 ベース位置変更時の張力楕円体

3.3節では6本のワイヤ長がすべて等しい場合において、ワイヤ長を変化させた場合の張力楕円体を示した。しかし、これはz軸方向のみの変化であり、現場での使用を考えると、様々な懸垂位置での検証が必要である。ここでは、高さ0.66m一定とし、水平方向にx,y軸ともに-0.3~0.3mの範囲でベース位置を変更した時の、張力楕円体をFig.10に示す。

並進方向の楕円体を見てみると、(-0.3,0.0)の位置では F_y よりも F_x の力に弱いのが、位置(0.3,0.0)では $F_y < F_x$ と逆転することがわかる。同様にモーメントを見てみると、x軸方向の位置変化では楕円体の変化はあまり見られないが、y軸方向に関しては形状が大きく変化することがわかる。



(a) Translational force (b) Moment
Fig.10 Tension Ellipsoid with changed position

7.2 ベース位置変更時のシミュレーション

ベースの位置を $(x, y, z) = (0.1, 0.1, 0.66)$ に移動させ、Fig.7と同様な外力を懸垂ベースに加えた場合のシミュレーションを行った。Fig.11とFig.12はそれぞれカウンタウェイトの制御なしと、制御ありの場合である。

まずFig.11を見ると、6本のワイヤ張力がすべて異なることがわかる。これはx,y軸方向にベースを移動させたことによりワイヤ長がバラバラになるためである。次に制御ありの場合のFig.12を見ると、制御を入れることで最小のワイヤ張力が上昇していることがわかる。しかし、すべてのワイヤ張力のバランスを取ることはできていない。この原因は、Fig.10からも分かるように、ベースを移動させたことにより、カウンタウェイトの各張力への影響力も変化したためである。懸垂位置により加わる外力の影響が変化するため、今後は懸垂位置を考慮したカウンタウェイトのより適切な制御法を構築するとともに、張力楕円体を利用して外力の影響を受けにくい方向での作業を検討していく必要がある。

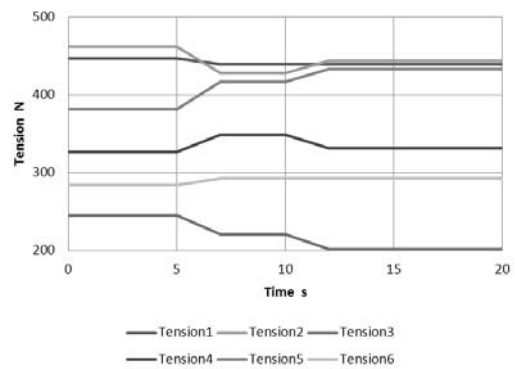


Fig.11 Uncontrolled wire tensions with changed position

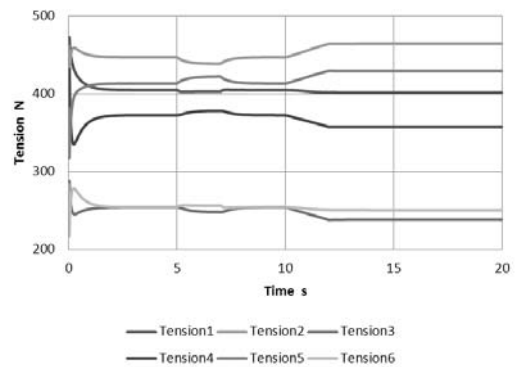


Fig.12 Controlled wire tensions with changed position

8. 結論

マニピュレータの作業範囲を拡大する手段として6本のワイヤでベースを懸垂するワイヤ懸垂型マニピュレータを提案した。そしてカウンタウェイトを用いることによってワイヤ張力を制御する手法を提案した。また、ワイヤ懸垂機構の特性を表現するために張力楕円体を提案した。カウンタウェイトを制御することで、ワイヤ張力を上昇させることに成功したが、懸垂ベースの外力特性は位置を変化させることにより刻々と変化し、カウンタウェイトの影響力も変化するためワイヤ張力に悪影響を及ぼす可能性もある。そのため、懸垂位置に対して適切な制御方法を検証していく必要がある。

参考文献

- (1) J.Albus,R.Bostelman,N.Dagalakis,“The NIST ROBOCRANE”, *Journal of Robotic Systems*, Vol.10, no.5, (1993) pp.709-724.
- (2) H.Osumi and M.Saito, “Control of A Redundant Manipulator Mouted on A Base Suspended by Six Wires”, *Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, (2006) pp.73-78.
- (3) J.Pusey, A.Fattah, S.Agrawl , E.Messina and A.Jacoff,“Design and Workspace Analysis of a 6-6 Cable-Suspended Parallel Robot” *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2003) pp.2090-2095.
- (4) 松本徹, 中村政美, 安田鉄太郎, 大隅久, “6本のワイヤで懸垂されたマニピュレータのカウンタウェイトによる反力制御”, 第16回ロボティクスシンポジウム予稿集 (2011)pp.411-416.