

多リンク型パラレルメカニズムによる立体空間位置決め装置の提案

芝田 京子^{*1} 沼田 裕介^{*2} 川口 忠雄^{*3}

A Proposal of Equipment for Positioning in a 3-dimensional Space with a Multi Links Type Parallel Mechanism

Kyoko SHIBATA, Yusuke NUMATA and Tadao KAWAGUCHI

ABSTRACT: A parallel mechanism has very good performance in terms of speed, accuracy and rigidity. So, recently these mechanisms have been used in a large number of applications and are becoming increasingly popular in the machine-tool industry. Then, in this research, two controllers, PID controller and 2-flexibility controller based on PID controller, were designed to control it. And, in this paper, the movement of the mechanism using each controller was simulated. Moreover, as increasing a number of links from 3 to 8, the movements of the mechanism were simulated. As a result, two conclusions were obtained. First, 2 flexibility control is more stable and responsive than PID control. Second, in the multi links type parallel mechanism, the stability is improved by the increase in the number of links. However, it is not at movements of all position. Further more, practical uses for developing our proposal have been mentioned at the end of this paper.

KEYWORDS: Multi links type parallel mechanism, PID control, 2-flexibility control, Reverse kinematics

(Received November 16, 2002)

1. はじめに

従来の機械では幾つかのメカニズムを積み重ねて、つまり機構を直列(series)につなげて機械を構成してきた。これをシリアルメカニズム(図1)と呼ぶ。現在、市場にある工作機械や測定機械、ロボットなどはほとんどがこの機構である。シリアルメカニズムは1つの駆動装置の先にリンク機構、続いて駆動装置…と直列につながるため、次々に負荷が加算されてしまう傾向にある。

シリアルメカニズムと対極にあるのがパラレルメカニズム(図2(a))であり、機構を並列(parallel)につなげて閉じたループを形成している。このようなメカニズムは駆動装置の先に駆動装置が存在しないため、シリアルメカニズムと比較し負荷や駆動装置による誤差の累積が少なくなる。また、出力対象の重さもリンクの数に分散される。よってパラレルメカニズムの長所は高速、高精度、高剛性で、短所は装置全体の大きさに対して出力対象の移動範囲が狭いことにある。パラレルメカニズムの原理は古くからあったものの、複雑な計算が必要なために発展していなかった。しかし近年、コンピュータ技術の発展に伴

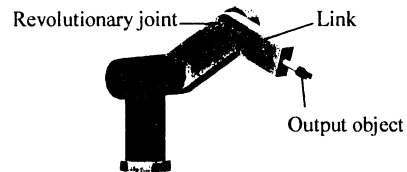


Fig. 1 Series mechanism

いパラレルメカニズムの研究が徐々に増えている¹⁾。

本論では、多リンク型パラレルメカニズムにおいて、コントローラの違いによるメカニズムの特性の違いを検討する。また、3リンク型から8リンク型までリンク数を増加させた場合の構造による違いも検討する。さらに、多リンク型パラレルメカニズムの実践的な適用例を提案する。本研究では DADS (Dynamic Analysis and Design System ; CAD ソフト) を使用し、多リンク型パラレルメカニズムの特性を表現している。また、MATLAB/Simulink と連動させシミュレーションを行っている。

2. 多リンク型パラレルメカニズムの構造

本研究で制御対象とする多リンク型パラレルメカニズムの構造を図2に示す。図2のパラレルメカニズムは3リンク型の例である。3つの直動関節が上下に移動することによりリンクでつながれた出力対象

*1 物理情報工学科助手

*2 物理情報工学専攻大学院生(現、京セラ(株))

*3 物理情報工学科教授 Professor, Dept. of Applied Physics

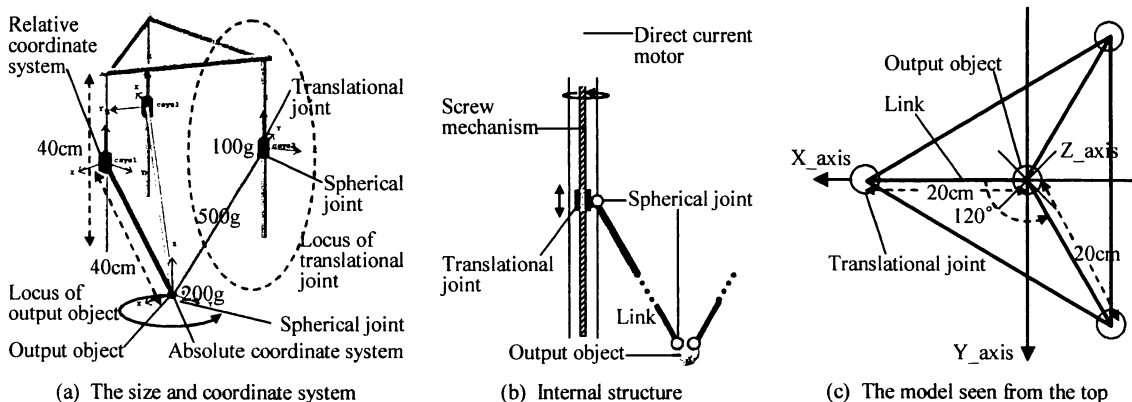


Fig. 2 3 links type parallel mechanism

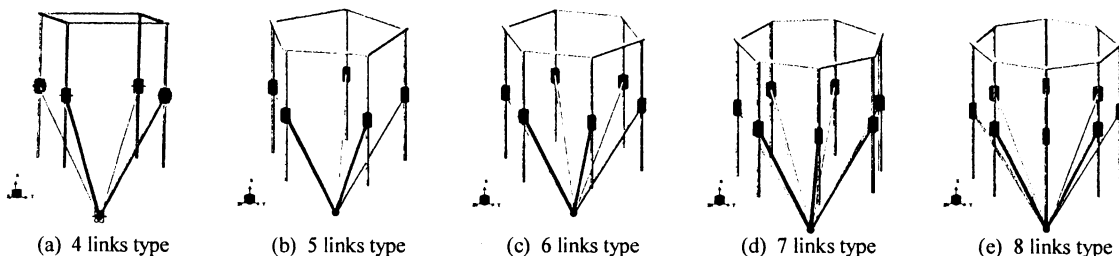


Fig. 3 Many links type parallel mechanism

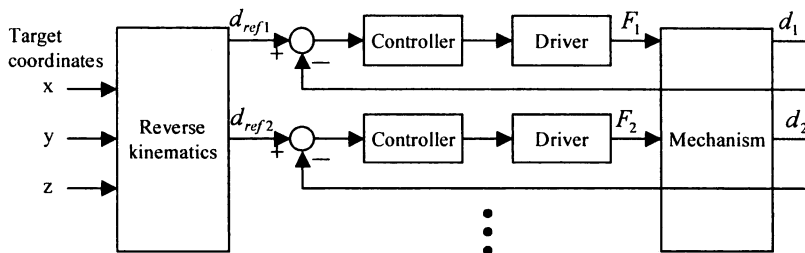


Fig. 4 The general block diagram of a multi-joint mechanism

が立体空間内(3次元内)で望み通りの軌跡を描くように動くことが可能となる。図2(a)に示すように、リンクの長さは40cm、直動関節の移動可能範囲は40cmである。図2(a)の破線内の構造の詳細を図2(b)に示す。一番上に直流モータ、その先に送りネジが取り付けられている。直流モータの発生する回転トルクを、送りネジ機構により直動関節の直線方向の力に変換している。直動関節部分には球面ジョイントを介しリンクが取り付けられている。リンクの先にはさらに球面ジョイントが取り付けられ出力対象へとつながっている。直動関節を100g、リンクを200g、出力対象を500gと設定した。また、図2(c)は、3リンク型パラレルメカニズムを真上から見た構造であり、3つの直動関節、リンクの配置方法を示す。出力対象の初期位置に絶対座標系の原点を設定する。1つ目の直動関節は初期位置からX軸方向に20cmの位置に配

置する。2,3つ目の直動関節は1つ目から 120° 、 240° 回転した位置とする。但し、Z軸方向の高さはこの説明には含めていない。図3(a)~(e)に4リンク型から8リンク型パラレルメカニズムの構造を示す。各部の詳細は3リンク型の場合と同様である。

3. 制御系設計

3.1 多関節機構を制御する場合の一般的な制御系
 パラレルメカニズム等、多関節機構を制御する場合の一般的なブロック線図を図4に示す²⁾。このブロック線図への目標入力(出力対象の座標(対時間変化分))としている。つまり、出力対象の目標の移動軌跡を表わしている。左から逆運動学、コントローラ、駆動装置を介しパラレルメカニズムの構造自体の特性を表わすブロックとなっている。コントローラと駆動装置はリンク数分つながっている。図4にお

る(x,y,z)は出力対象の座標変化, $d_{ref1}, d_{ref2} \dots$ は直動関節の上下への目標移動距離, $F_1, F_2 \dots$ は直動関節を動かそうとする力, $d_1, d_2 \dots$ は実際の直動関節の上下への移動距離である。

3.2 逆運動学

パラレルメカニズムに限らず一般に多関節機構の運動を制御する場合, 直接, 装置に対し力を加えているのは各駆動装置になる。このために出力対象の目標移動軌跡を決定した場合には, 各駆動装置の目標の運動を決定しなければならない。この変換を逆運動学により求めている³⁾⁴⁾⁵⁾。逆運動学の考え方は, 出力対象や直動関節に図 2(a)に示すように絶対座標系に対する相対座標系を1つ1つ設定していき, その座標系間の変換行列を求めていくことにより出力対象の目標座標と直動関節の目標移動距離の関係を求める。このようにして求めた逆運動学の変換式を示す。ここでは, 例として 8 リンク型パラレルメカニズムの変換式を式(1)から式(8)に示す。

$$d_{ref1} = z - 20\sqrt{3} + 40 \cos \alpha_1 \cos \beta_1 \quad (1)$$

$$\text{但し, } \begin{cases} \alpha_1 = \sin^{-1} \left(\frac{y}{40} \right) \\ \beta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{20-x}{40 \cos \alpha_1} \right) \end{cases}$$

$$d_{ref2} = z - 20\sqrt{3} + 40 \cos \alpha_2 \cos \beta_2 \quad (2)$$

$$\text{但し, } \begin{cases} \alpha_2 = \sin^{-1} \left(\frac{-\sin(\pi x/4) + \cos(\pi y/4)}{40} \right) \\ \beta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{x - 20 \cos(\pi/4) + 40 \sin(\pi/4) \sin \alpha_2}{-40 \cos(\pi/4) \cos \alpha_2} \right) \end{cases}$$

$$d_{ref3} = z - 20\sqrt{3} + 40 \cos \alpha_3 \cos \beta_3 \quad (3)$$

$$\text{但し, } \begin{cases} \alpha_3 = \sin^{-1} \left(\frac{-\sin(\pi x/2) + \cos(\pi y/2)}{40} \right) \\ \beta_3 = \sin^{-1} \left(\frac{x - 20 \cos(\pi/2) + 40 \sin(\pi/2) \sin \alpha_3}{-40 \cos(\pi/2) \cos \alpha_3} \right) \end{cases}$$

$$d_{ref4} = z - 20\sqrt{3} + 40 \cos \alpha_4 \cos \beta_4 \quad (4)$$

$$\text{但し, } \begin{cases} \alpha_4 = \sin^{-1} \left(\frac{-\sin(3\pi x/4) + \cos(3\pi y/4)}{40} \right) \\ \beta_4 = \sin^{-1} \left(\frac{x - 20 \cos(3\pi/4) + 40 \sin(3\pi/4) \sin \alpha_4}{-40 \cos(3\pi/4) \cos \alpha_4} \right) \end{cases}$$

$$d_{ref5} = z - 20\sqrt{3} + 40 \cos \alpha_5 \cos \beta_5 \quad (5)$$

$$\text{但し, } \begin{cases} \alpha_5 = \sin^{-1} \left(\frac{-\sin(\pi x) + \cos(\pi y)}{40} \right) \\ \beta_5 = \sin^{-1} \left(\frac{x - 20 \cos(\pi) + 40 \sin(\pi) \sin \alpha_5}{-40 \cos(\pi) \cos \alpha_5} \right) \end{cases}$$

$$d_{ref6} = z - 20\sqrt{3} + 40 \cos \alpha_6 \cos \beta_6 \quad (6)$$

$$\text{但し, } \begin{cases} \alpha_6 = \sin^{-1} \left(\frac{-\sin(5\pi x/4) + \cos(5\pi y/4)}{40} \right) \\ \beta_6 = \sin^{-1} \left(\frac{x - 20 \cos(5\pi/4) + 40 \sin(5\pi/4) \sin \alpha_6}{-40 \cos(5\pi/4) \cos \alpha_6} \right) \end{cases}$$

$$d_{ref7} = z - 20\sqrt{3} + 40 \cos \alpha_7 \cos \beta_7 \quad (7)$$

$$\text{但し, } \begin{cases} \alpha_7 = \sin^{-1} \left(\frac{-\sin(3\pi x/2) + \cos(3\pi y/2)}{40} \right) \\ \beta_7 = \sin^{-1} \left(\frac{x - 20 \cos(3\pi/2) + 40 \sin(3\pi/2) \sin \alpha_7}{-40 \cos(3\pi/2) \cos \alpha_7} \right) \end{cases}$$

$$d_{ref8} = z - 20\sqrt{3} + 40 \cos \alpha_8 \cos \beta_8 \quad (8)$$

$$\text{但し, } \begin{cases} \alpha_8 = \sin^{-1} \left(\frac{-\sin(7\pi x/4) + \cos(7\pi y/4)}{40} \right) \\ \beta_8 = \sin^{-1} \left(\frac{x - 20 \cos(7\pi/4) + 40 \sin(7\pi/4) \sin \alpha_8}{-40 \cos(7\pi/4) \cos \alpha_8} \right) \end{cases}$$

3から7リンク型パラレルメカニズムの場合も同様に逆運動学に基づき, 変換式を求めている。

3.3 制御対象

本研究での制御対象は, 図 2(b)に示す駆動装置と図 3(a)~(e)の多リンク型パラレルメカニズム装置自体となる。図 4 で駆動装置への入力電圧であり, 出力は直線方向の力とする。また, 装置自体の特性の表現には DADS を使用し, モデルをコンピュータ上で作成することで, その特性を1つのブロックに変換した。これにより, 研究コストを抑え, 研究効率の向上をはかることができた。

3.4 コントローラ設計

本研究では, ITAE 法(Integral of Time multiplied by Absolute Error)によりコントローラを決定する⁶⁾。ITAE 法では, あらかじめ理想とする伝達関数を決定し, その伝達関数と実際の伝達関数(制御対象, コントローラを加えた伝達関数)が一致するようにコントローラの値を決定する。コントローラの設計においては, 制御対象である駆動装置(直流モータと送りネジ機構)には電流制御を用いて近似し, 設計を容易にしている⁷⁾。このような方法で PID コントローラを設計した。また, この PID コントローラにフィードフォワードコントローラを取り付け, 2 自由度制御とした場合のコントローラも設計した。

4. シミュレーション

4.1 PID コントローラにおけるリンク数の違いによる比較

3から8リンク型パラレルメカニズムに対し3.4節で設計した PID コントローラを採用し, シミュレーションを行った。DADS と MATLAB/Simulink をリンクさせ作成した 8 リンク型パラレルメカニズムの MATLAB/Simulink 画面上のブロック線図を図 5 に示す。図 5 では, 逆運動学と駆動装置のブロックを拡大して示した。駆動装置 1~8 は, すべて同じブロッ

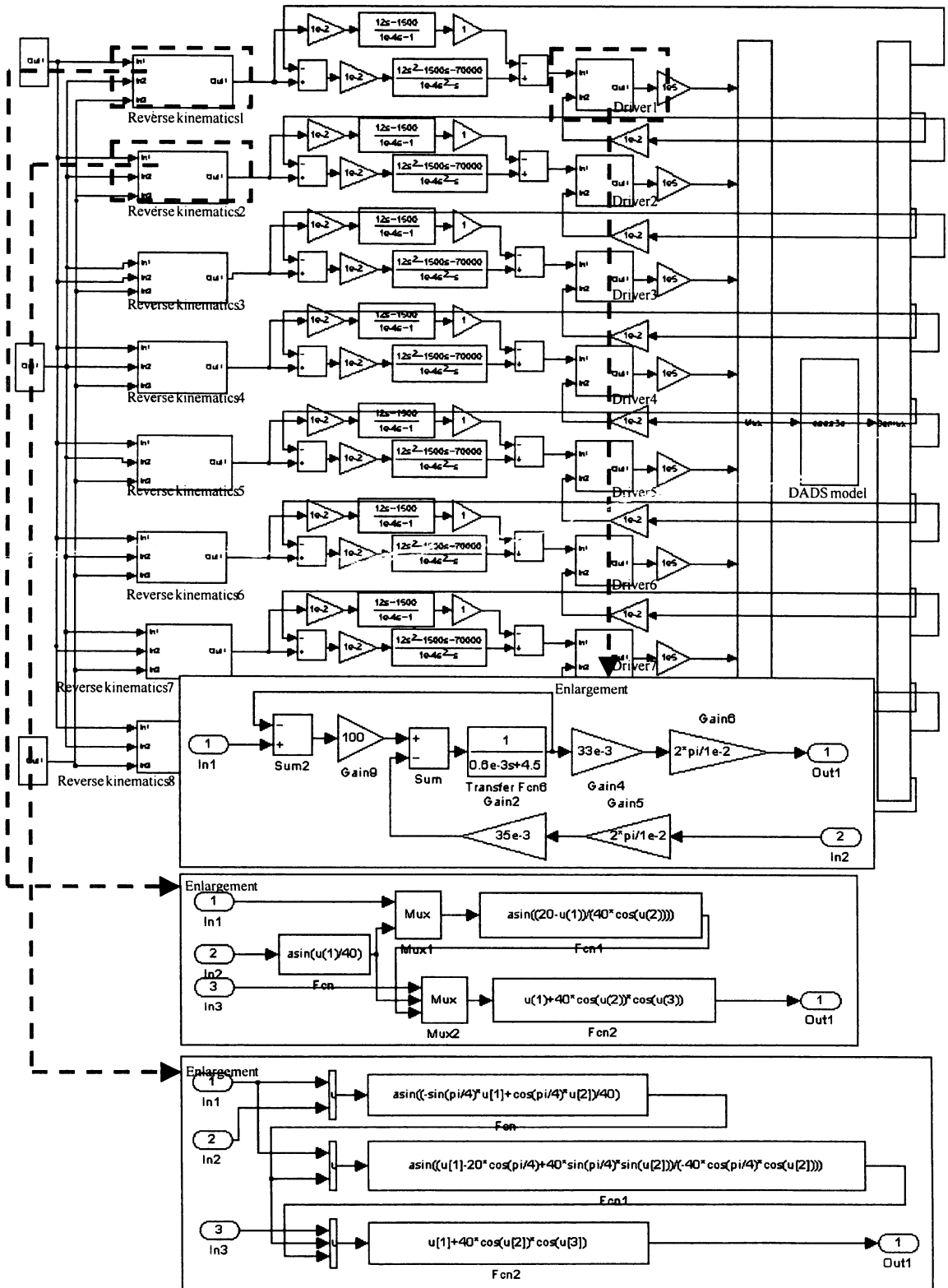


Fig. 5 Block diagram of 8 links type parallel mechanism

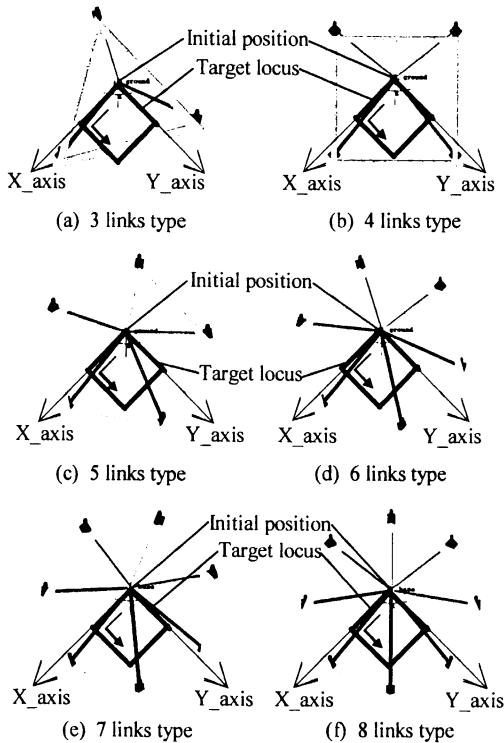


Fig. 6 Target loci

クになる。また、逆運動学 1~8 は、順に式(1)~(8)を当てはめている。また、DADS モデルのブロックは、多リンク型パラレルメカニズムの装置自体である。例として、式(1)(2)をブロック線図表示させた場合の拡大図を示した。図 6(a)~(f)に Z 軸(モデルの真上)方向から見た場合のモデルと出力対象の目標軌跡を示す。目標軌跡は、初期位置から図の矢印で示す方向に、一辺 10cm の正方形を描くように設定した。出力対象の速度を 10cm/s とした。

図 7 は、3 から 8 リンク型パラレルメカニズムのシミュレーション結果である。図 7(a)が、モデルを Z 軸方向から見た場合の出力対象の軌跡を示している。この図より、1 辺 10cm の正方形が描けていることが読み取れる。正方形の各頂点を(A)(B)(C)とし、拡大した図を図 7 (b)(c)(d)に示す。拡大率は 0.1cm-1cm としている。図 7(b)(d)から、リンク数が少ない方が振動的になり、リンク数が多いほど振動の幅が小さく安定していることが読み取れる。頂点(B) (図 7(c))に関しては、リンク数の違いによる差はほとんどない。

リンク数が増加すれば、出力対象の負荷の分散や各駆動装置の誤差を平均化するために精度が良くなると考えていた。しかし、図 7 のシミュレーション結果より、移動位置によっては必ずしもリンクの増加が精度の向上につながる結果となった。頂点(B)については 6.1 節にて考察する。

4.2 2 自由度制御におけるリンク数の違いによる比較

4.1 節の PID コントローラに、フィードフォワード

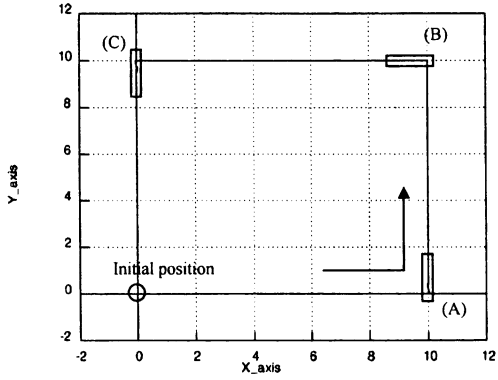
コントローラを加え 2 自由度制御とした場合における 3 から 8 リンク型パラレルメカニズムのシミュレーション結果を図 8 に示す。目標軌跡は、4.1 節同様、図 6 に示す一辺 10cm の正方形とした。図 8(a)が、モデルを Z 軸方向から見た場合の出力対象の軌跡を示している。この図より、1 辺 10cm の正方形が描けていることが読み取れる。また、正方形の各頂点を(A)(B)(C)とし、拡大した図を図 8(b)(c)(d)に示す。拡大率は、図 8(b)(d)、すなわち頂点(A)(C)は、図 7 同様、0.1cm-1cm とし、図 8(c)、すなわち頂点(B)に関しては、0.01cm-0.1cm と他の図よりも拡大率を高くしている。2 自由度制御の場合も図 8(b)(d)から、リンク数が少ない方が振動的になり、リンク数が多いほど振動の幅が小さく安定していることが読み取れる。頂点(B) (図 8(c))に関しては、3 リンク型が最も誤差が大きくなり、続いて 8 リンク型、7 リンク型...4 リンク型となっており、4.1 節同様、リンク数の増加が精度の向上につながる結果となった。しかしながら、図 8(c)において、最も安定している 4 リンク型と最も不安定な 3 リンク型での振動の差は、わずかに 0.002cm ほどである。頂点(B)に関しての考察も 6.1 節にて行う。

5. パラレルメカニズムの実用化案

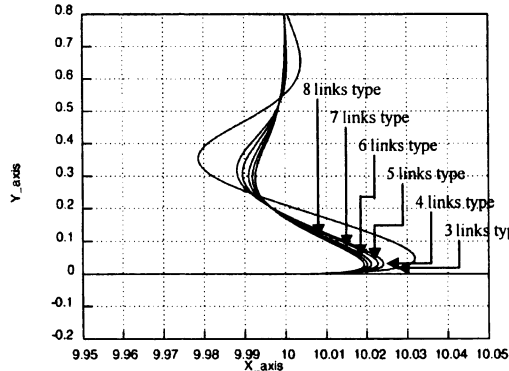
すでに、パラレルメカニズムはフライトシミュレータや工作機械分野で使用されている⁸⁾が、更に利用価値のありそうな、次の 3 つの応用例を考えた。

1. 高層ビルなどの工事現場における運搬機械(図 9) 現在のビルの建設では、高層階の建設においてクレーンを建設し、物資の運搬に使用している。しかし、高層階であるため強風などの影響を受け、危険性が伴い、位置決めも困難である。このクレーンをパラレルメカニズム構造にすることにより安定性が増し安全に工事を進められ、的確に位置決めが可能となる。
2. ドーム球場などの天井移動式カメラ(図 10) 現在、東京ドームのマウンドの真上にある天井にはカメラが設置されている。このカメラは固定式でマウンドを真上から撮影することしかできない。パラレルメカニズム構造でカメラを接続することにより 360 度自由に移動させることが可能となる。この方式により、ピッチャーだけでなく、外野手や内野手の動きも天井から撮影が可能となる。
3. ロボットアームの手首関節(図 11)

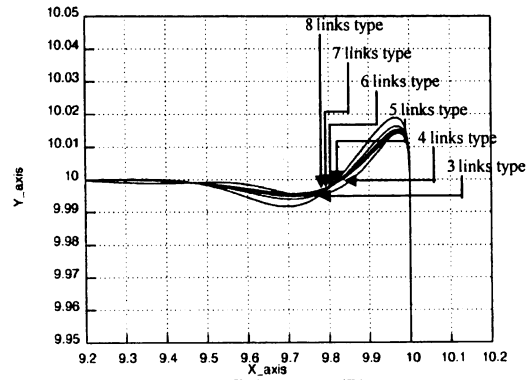
人間の手首は、他の関節以上に、複雑かつスムーズに動かすことができる。今までのロボットでは回転関節を使用していたため、人間と比べると、ぎこちない動きとなってしまった。しかし、パラレルメカニズム構造を採用することにより人間と同等かそれ以上の動きが可能になると考えられる。本来、人間の構造は、複数の筋肉の収縮により関節を動かしているため、基本的にパラレルメカニズム構造であると考えられる。よって、パラレル



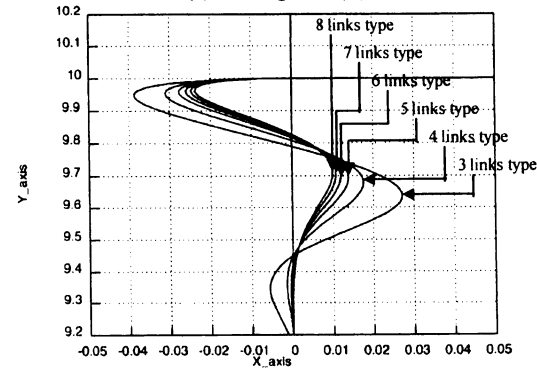
(a) The simulation result



(b) Enlargement(A)

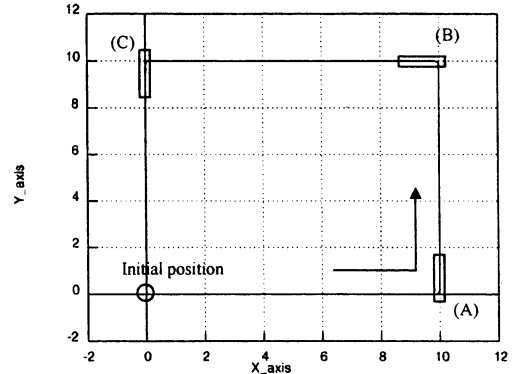


(c) Enlargement(B)

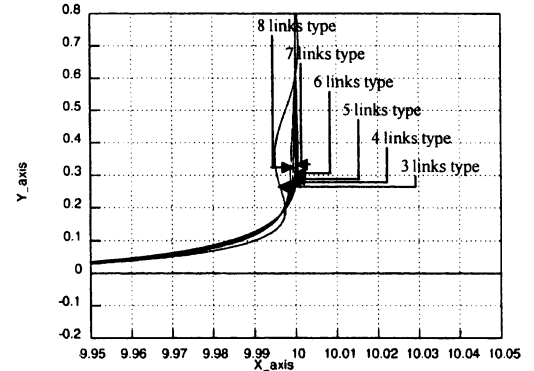


(d) Enlargement(C)

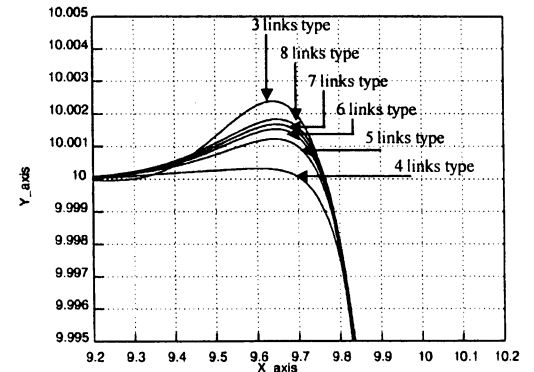
Fig. 7 The simulation of PID controller



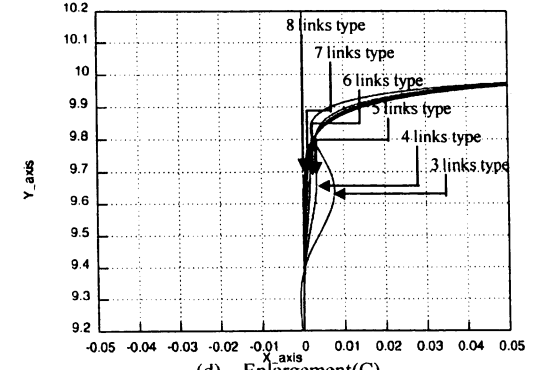
(a) The simulation result



(b) Enlargement(A)



(c) Enlargement(B)



(d) Enlargement(C)

Fig. 8 The simulation of 2 flexibility control

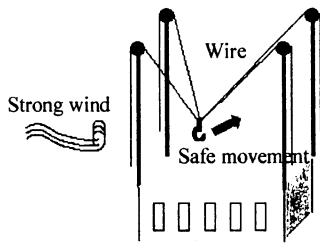


Fig. 9 Construction of an upper layers story

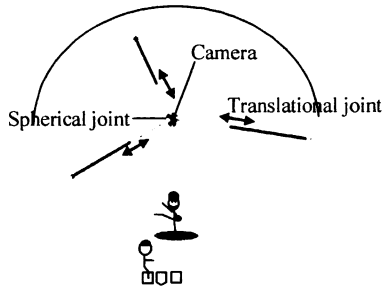


Fig. 10 360° move camera

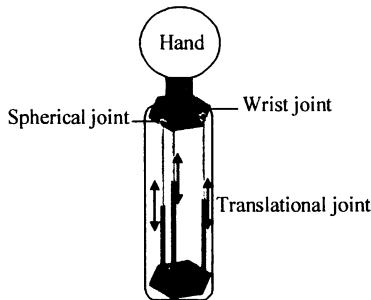


Fig. 11 Wrist joint

メカニズムを研究することにより人間の解析にも役に立つと考えられる。

6. 考 察

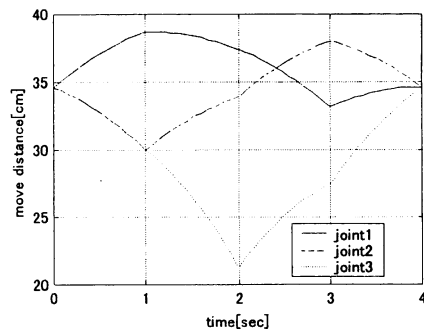
6.1 コントローラ 構造による比較

シミュレーション結果(図 7,8)を用いて比較を行う。まず、PID コントローラだけの場合と 2 自由度制御の場合とを比較すると、2 自由度制御の場合の方が振動が極端に減少し安定性が増していることが分かる。これは、軌跡の拡大図(b)(c)(d)が示すように、PID コントローラの場合は目標位置である正方形の頂点に到達してから次の目標位置の軌跡への補正が行われるのに対し、2 自由度制御の場合はフィードフォワードコントローラの効果により正方形の頂点に達する前から補正を行うことによる。

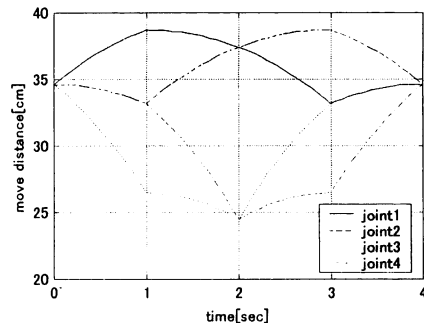
次に平行メカニズムのリンク数による比較では、全体的にリンク数の多い方が振動が少なく安定している傾向がある。これは前述したように、リンク数の増加が出力対象の負荷の分散や各駆動装置の誤差を平均化するため精度が向上するからと考えら

れる。しかし、移動位置(図 7(c), 図 8(c), すなわち頂点(B))によっては必ずしもこの傾向が当てはまらないことも分かった。この原因について考える。図 12(a)(b)は、図 8(c), すなわち頂点(B)において最も不安定であった 3 リンク型と最も安定であった 4 リンク型平行メカニズムの各直動関節の Z 軸方向の移動距離を表わしている。出力対象の移動速度は 10cm/s と設定しているので、目標軌跡(図 6)である正方形の各頂点を通過するのは(A)が 1 秒、(B)が 2 秒、(C)が 3 秒、初期位置に戻るのが 4 秒となる。図 12(a)(b)において次の 3 点に注目した。

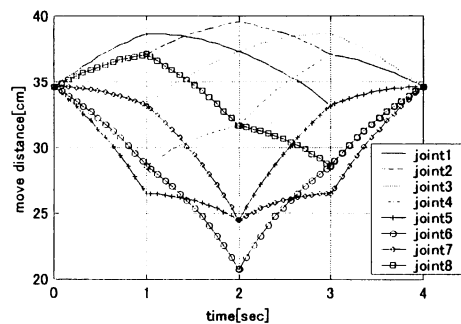
1. 3 リンク型における 3 つの直動関節の移動範囲、約(38.0-22.0)=16.0cm に比べ、4 リンク型は約(38.0-24.5)=13.5cm とかなり狭くなっている。
2. 3 リンク型における 3 つの直動関節のうち joint3 だけが他の直動関節に比べ移動距離が長く、4 リ



(a) Move distance of translational joint of 3 links type



(b) Move distance of translational joint of 4 links type



(c) Move distance of translational joint of 8 links type

Fig. 12 Move distance of translational joint

リンク型では joint1 と joint2, joint3 と joint4 の移動距離がそれぞれ等しい。

3. 図 12 の軌跡の傾きは、速度を表している。移動距離が長いほど、傾きは急になり、加速度が大きくなる。また、1,2,3 秒の各点における軌跡をつくる 180 度以下の角度は、速度の傾きが切り換わることを意味する。4 リンク型においては軌跡が鋭角を形成する点はないが、3 リンク型においては、2 秒のとき、joint3 が鋭角になっている。
1. については、移動距離は広いほどリンク自体の傾きが大きくなるということであり、よって出力対象に大きな負荷がかかると考えられる。2. については、4 リンク型は図 12(b)を見ても左右対称となっており、バランスが良い。3 リンク型における joint3 の直動関節による長い移動距離が、他の直動関節との協調に悪影響を与えたと考えられる。3. については、鋭角の点では、速度の向きが急変するというものであるから、よって出力対象の動きに不安定さが増すと考えられる。図 12(c)に、一番リンク数の多い 8 リンク型パラレルメカニズムの場合の Z 軸方向の移動距離を示す。図 8(b)において 8 リンク型は 3 リンク型に続いて振動が大きくなっているが、これに関しても上記 1., 3. の注目点における考察が当てはまる。図で示していない 5~7 リンク型の場合の 2 秒における頂点(B)での移動軌跡にも上記いずれかの考察が当てはまり、4 リンク型がこの観点において最適であることが読み取れた。

6.2 実機への適用

実際にパラレルメカニズムを組み立てて高精度を求める場合に、リンク数を増加することは 1 つの手段であると考えられる。しかし、リンク数の増加にはコストと構造上の問題がある。コストとは、リンク数の増加による駆動装置の増加である。また、構造上の問題とは、次にあげる 2 つが考えられる。

1. 関節(球面ジョイント)の限界である。出力対象とリンクの接続は、球面ジョイントで行われるため、1 点の球面ジョイントによる最大接続本数に限界があると考えられる。
2. 複数の駆動装置の内、1 つの駆動装置だけでも目標の動きとずれが生じた場合である。位置制御は 3 リンク型で可能となる。仮に、3 リンク型の 1 つの駆動装置において設計仕様とは若干のずれが生じた場合にも、出力対象の位置にずれが生じるだけで、装置自体の停止や破損につながるであろう。しかし、4 リンク型以上の場合において、駆動装置にずれが生じた際には、ずれの生じた駆動装置につながるリンクが足かせとなり、装置自体の停止や破損につながる可能性が考えられる。

7. おわりに

本研究では、多リンク型パラレルメカニズムを制御対象とし、ITAE 法で設計したコントローラにより

シミュレーションした結果、次の知見を得た。

1. コントローラは PID コントローラよりも 2 自由度制御とした場合の方が安定性、速応性ともに大きく向上した。
2. 多リンク型パラレルメカニズムにおいて、リンク数の増加が安定性の増加につながる傾向にあることが確認できた。しかし、出力対象の移動位置によっては、必ずしもこの傾向が当てはまらないことになった。

今後の展望として、リンクの配置位置や目標軌跡、初期位置からの距離の検討を加えることで、リンク数の増加が必ず安定性の向上につながる範囲、つながらない範囲の検討や、実機を用いた実験結果を報告したい。

参考文献

- 1) JEAN-PIERRE, MERLET : Parallel Robots, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, (2000).
- 2) 竹尾 光治, 小管 一弘 : パラレルメカニズムの運動制御, 精密工学会誌, 63, 12 (1997)1655.
- 3) 杉本 浩一 : パラレルメカニズムの運動学と動力学, 精密工学会誌, 63, 12 (1997)1647.
- 4) 有本 卓 : ロボットの力学と制御, 朝倉書店, (1995).
- 5) 吉川 恒夫 : ロボットマニピュレータ, コロナ社, (1989).
- 6) RICHARD C.DORF, ROBERT H.BISHOP : MODERN CONTROL SYSTEMS, ADDISON-WESLEY, (1999).
- 7) 細江 繁幸 : システムと制御, オーム社, (1999).
- 8) 服部 和也 : パラレルメカニズムによる複合加工, 第 276 回講習会「成功する IT 時代の複合化・多軸制御加工技術 -工作機械の新たななるねらい-」テキスト, 精密工学会, (2001)20.