

/ 製品紹介 /

高速水平多関接ロボットYK640, YK840シリーズの開発

Development of Series K640 and YK840 Horizontal Articulated High Speed Robots

馬目俊文*
Toshihumi Manome

木宮祐三**
Yuhzo Kimiya

1. はじめに

ヤマハ水平多関接型ロボットの主力機種であるYK8000シリーズが発売されて5年が経過した。発売当時、このロボットの標準サイクルタイムは、世界最速の0.98秒であったが、近年、水平多関接型ロボットの標準サイクルタイムは、0.8秒台に到達し、中には0.8秒を切るものも現れた。

ヤマハ水平多関接型ロボットは、この間、大型高可搬重量のYK1200シリーズ、全体上下のYK5000シリーズ、低価格で小型のYK4000シリーズと特徴のあるロボットを世に送り出すとともに、ロボットの高速化のための研究を続けてきた。そして、平成4年1月、高速水平多関接型ロボットYK640シリーズ（写真1）とYK840シリーズを発売した。

このシリーズの特徴は次のとおりである。

- (1) 標準サイクルタイムは、YK640シリーズが0.7秒台、YK840シリーズが0.8秒台と高速動作が可能である。
- (2) 他社の水平多関接型ロボットよりも低価格で、しかも、高性能である。
- (3) 表1に示すように、YK640シリーズ、YK840シリーズともX軸アームの選択によって、2

種類の動作範囲を選べる。また、YK640シリーズでは、Z軸ストロークを100mmと200mmの2種類もっている。これによってユーザーは、この中からラインに合わせた最適なロボットを選ぶことができる。

- (4) 新型モーターと高剛性減速機の採用、及び、ハーネスマシーンの一本化により、耐久性と信頼性がさらに向上している。

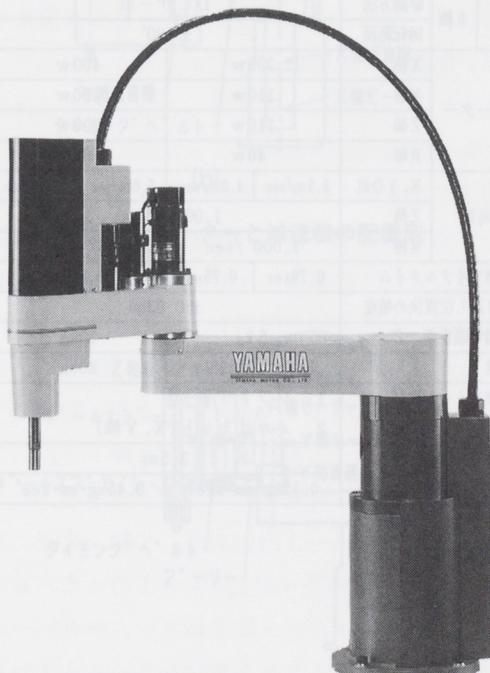


写真1 YK640シリーズ

*、** I M事業部技術部

(5) シミュレーションによる最適設計を行い、軽量、コンパクトで、剛性のあるロボットである。

以下にYK640を中心に、開発上のポイント、特に、ロボットの高速化について説明する。

図1に標準サイクルタイムポイントを示す。標準サイクルタイムは25mmの上下移動、300mmの左右移動の往復時間である。また、図2にYK640(YK540)の外観図を示す。

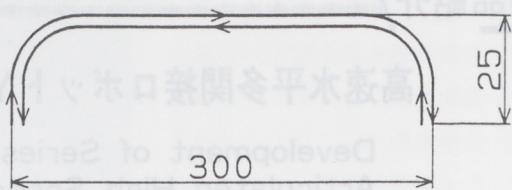


図1 標準サイクルタイムポイント

表1 基本仕様

	YK540	YK640	YK740	YK840
DCサーボモータ軸数	4軸			
軸 仕 様	X軸 アーム長	250mm	350mm	350mm
	回転範囲	$\pm 110^\circ$		
	Y軸 アーム長	250mm	350mm	
	回転範囲	$\pm 145^\circ$	$\pm 140^\circ$	
モーター	Z軸 駆動方法	DCサーボ		
	ストローク	100, 200mm	200mm	
	R軸 駆動方法	DCサーボ		
	回転範囲	$\pm 180^\circ$		
最高速	X軸	300w	400w	
	Y軸	110w	200w	
	Z軸	110w	200w	
	R軸	40w	60w	
標準サイクルタイム	X, Y合成	3.5m/sec	4.0m/sec	5.0m/sec
	Z軸	1,000mm/sec		
	R軸	1,000°/sec	667°/sec	
繰り返し位置決め精度	$\pm 0.03\text{mm}$			
先端可搬重量	5kg		10kg	
重量	34kg	35kg	80kg	
動作リミット設定	1. ソフトリミット 2. メカリミット(X, Y軸)			
ロボットケーブル	3.5m			
R軸許容イナーシャ	0.12kg·cm·sec ²		0.45kg·cm·sec ²	

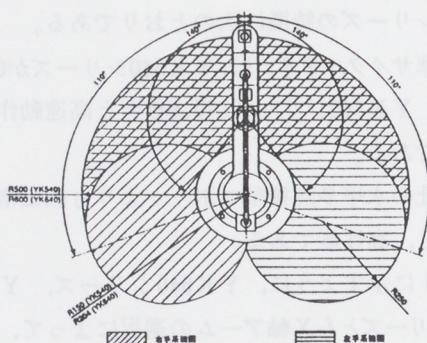
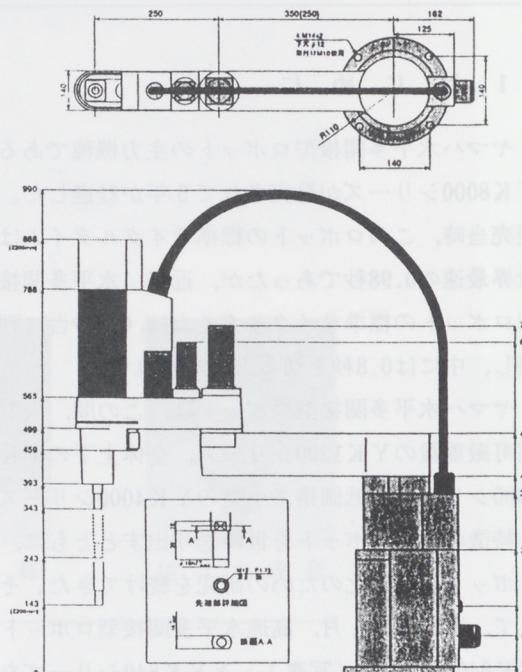


図2 YK640 (YK540) の外観図

2. ロボットの構造の最適化

2.1 駆動モーター、及び減速機の配置位置

各軸のモーターと減速機をロボットのどの位置に配置するかによって、ロボットの性能、メンテナンス性、価格、外観は著しく異なる。特に、ロボットの動作性能に対する影響が大きい。

ここでいう動作性能とは、図3のようにロボットの先端軸がポイントAからポイントBへ移動する時間がいかに短いかという意味である。移動時間を短くするには、一般に、モーターの加速度を上げれば良い。しかし、モーターに流せる最大電流及び、減速機の許容トルク等には限界があるので、モーター軸まわりの負荷の慣性モーメントができるだけ小さくなるよう設計する必要がある。

たとえば、図4に示すようにX軸、Y軸のモーターと減速機が配置された2つのタイプのロボットを考えてみる。(a)は従来型のロボットであり、X軸、Y軸のモーターと減速機は直接に直結している。(b)はX軸モーターと減速機をベース内におさめ、Y軸モーターをX軸アームのX軸に置き、タイミングベルトでY軸の減速機を駆動している。(b)は(a)に比べ、X軸まわりの慣性モーメントは小さく、X軸の加速度を上げることができる。しかし、X軸のモーターと減速機、及び、Y軸の減速機のメンテナンスがやりにくく、部品数が増えるためロボットの価格は高くなる。

このように、各軸モーターと減速機等のいろいろな配置パターンにおけるX軸とY軸まわりのアームの慣性モーメントを比較し、コストとメンテナンス性を検討した結果、図5に示す構造を採用することにした。

この構造の特徴を以下に説明する。

2.2 X軸

X軸のモーターと減速機は、従来型のX軸アームのX軸上からベース内へ移し、X軸まわりのX軸アームの慣性モーメントの低減をはかっている。

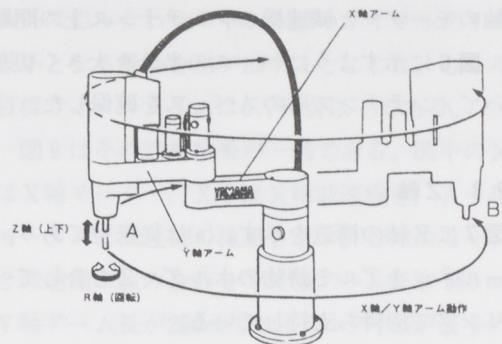


図3 ロボットの動作

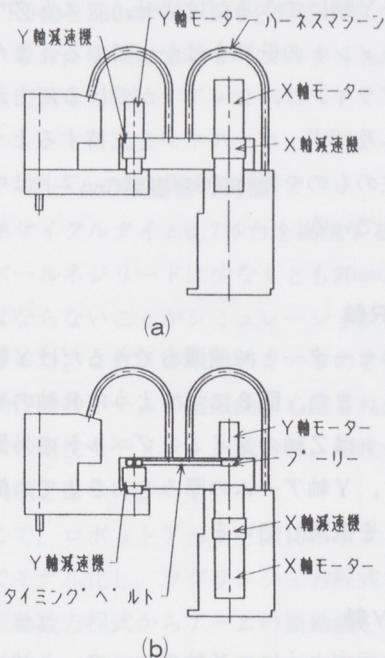


図4 モーターと減速機の配置例

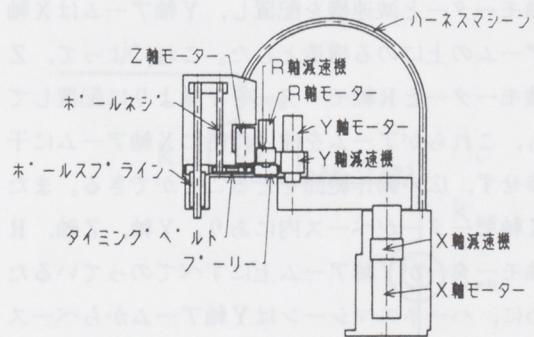


図5 YK640のモーターと減速機の配置

X軸のモーターと減速機のメンテナンス上の問題は、図6に示すようにベースの半分を大きく切り欠いてメンテナンス用のスペースを確保した。

2.3 Z軸

図7にZ軸の構造を示す。(a)は従来型であり、ボールネジをアルミ鋳物のホルダーZを介してベアリングで両持ち支持している。

今回、採用した(b)では、ホルダーZをなくし、ボールネジを片持ち支持している。さらにZ軸モーターをY軸にできるだけ寄せ、コストダウンと慣性モーメントの低減をはかっている。また、ホールスフライインは、シャフトが受ける反力がボールネジへ及ぼず、ボールネジを支持するよう大口径高剛性のものを使っており、シャフトは中空構造となっている。

2.4 R軸

R軸のモーターと減速機もできるだけY軸によせている。また、図8に示すようにR軸のタイミングベルトはZ軸のタイミングベルトの外側を通過しており、Y軸アームの厚みをおさえて、慣性モーメントを低減している。

2.5 Y軸

図5に示すように、Y軸のモーターと減速機はメンテナンス性とコストを考慮して、Y軸関接部に直結したが、従来型と比べてY軸アーム上にY軸モーターと減速機を配置し、Y軸アームはX軸アームの上にのる構造とした。これによって、Z軸モーターとR軸モーターをY軸よりに配置しても、これらがアームを曲げた時にX軸アームに干渉せず、広い動作範囲をとることができる。またX軸モーターがベース内にあり、Y軸、Z軸、R軸モーターがY軸アーム上にすべてのついているために、ハーネスマシーンはY軸アームからベースまでの一本ですみ、コストダウンとハーネスマシーンの信頼性をより向上させることができた。

2.6 X軸アーム

X軸駆動系をベース内に、Y軸駆動系をY軸アームに配置したことにより、X軸アームの交換だけでロボットのアーム長を変えることができる。これによって、ロボットの生産工場では、X軸ベースアッシャーとY軸アームアッシャーをあらかじめ組み立てておき、ユーザーからの発注に応じてX軸アームを選んで迅速に出荷することもできる。

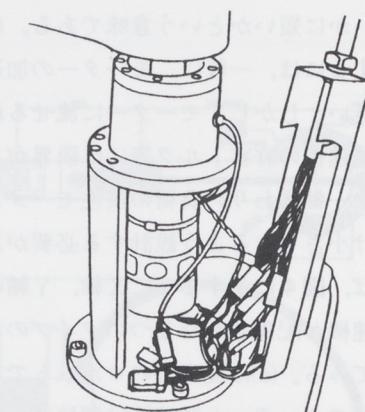


図6 ロボットのベース部

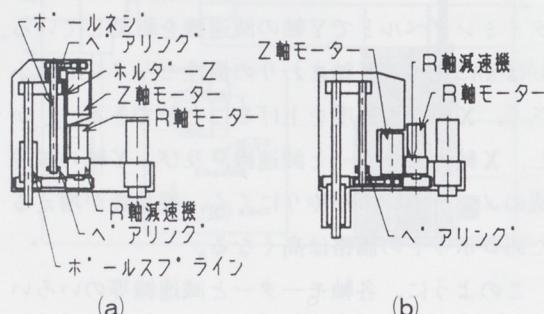


図7 Z軸の構造

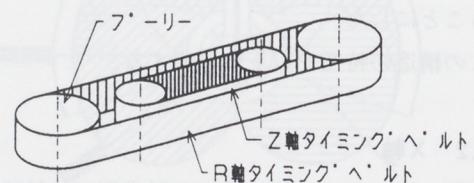


図8 R軸の構造

3. 機械要素の最適化

3.1 X軸, Y軸のモーターと減速機の容量, 及び, アーム長の決定

モーターと減速機の容量を上げれば加速度は容易に上げられるように思われる。しかし、容量を上げると、モーターと減速機のローターの慣性モーメントが増え、モーターの電流値の半分以上がその加速に使われてしまい、思ったほど加速度は上げられない。また、コストも上昇する。Y軸のモーターと減速機の容量をいたずらに上げれば、重量増によってX軸の負荷が増えてしまう。

従って、性能をフルに使ってロボットの目標性能を引き出せるような、決してオーバースペックでないモーターと減速機の組み合わせを選ぶ必要がある。さらに、X軸, Y軸のモーターと減速機にかかる負荷のバランスを最適にするX軸とY軸のアーム長がある。これらの最適な組み合わせは、以前は設計者の勘にたよるところが多く、ロボットの評価の段階で、モーターと減速機容量の不足、及びバランスの悪さによって目標性能が出ない場合もあった。

そこで、ロボットアームの運動方程式をラグランジエ方程式で定式化したシミュレーションを用いて、X軸, Y軸のモーター、減速機、及びアーム長

の組み合わせの中から標準サイクルタイムが最小となる場合を選び出した。もちろん目標サイクルタイムは0.7秒台以下である。

図9はその計算結果の一例である。図中のXMはX軸モーター、XGはX軸減速機を、A~Hはモーターと減速機の種類を示す。O印のモーターと減速機の組み合わせでX軸アーム長が350mm, Y軸アーム長が250mmでサイクルタイムが最小の0.77秒となった。これよりYK640シリーズは、Y軸アーム長は共通の250mmで、X軸アーム長が350mmのYK640と250mmのYK540を製作することに決めた。なお、実機によるサイクルタイムはほぼ同タイムであった。

3.2 アームの縦振動の抑制

標準サイクルタイム0.7秒台を実現するには、Z軸のポールネジリードは少なくとも20mm以上でなければならないことがシミュレーションより明らかになった。これは従来機のリードの2倍であり、Z軸動作時のアームの縦振動が心配され、いかにアームの慣性モーメントを減らし、剛性を上げるかが問題となった。

そこで、ロボットアームを図10に示す7つのばね系でモデル化し、ラグランジエ方程式で定式化した振動数方程式からアームの振動数を求めて検討を行った。計算結果からアーム振動数はX軸ベアリングのばね定数 k_{xb} に最も影響を受け、Y軸アームのはり部、Y軸のベアリング、及びシャフ

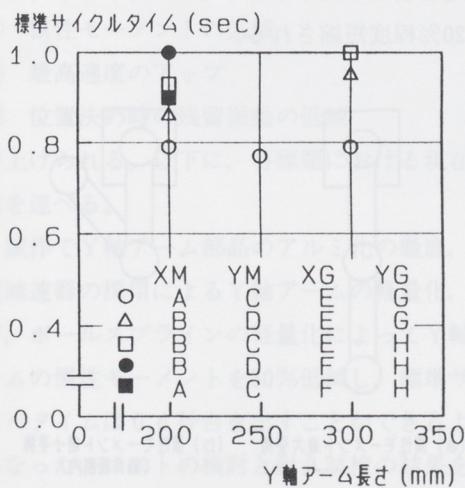


図9 標準サイクルタイム (X軸アーム長=350mm)

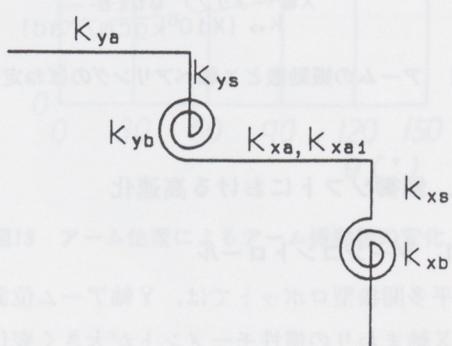


図10 ロボットアームの縦振動モデル

トのばね定数kya, kys, kybにはあまり影響を受けないことがわかった。

図11にX軸ペアリングのばね定数kxbを変えた時のアームの第1振動モード周波数f₁の計算の結果を示す。従来機の実験結果から最大負荷重量5kgで周波数は20Hz以上確保しなければならないこと、計算値が実験値よりやや高めの値を示す傾向があることから、X軸ペアリングはBを選択した。また、Y軸のアーム、シャフト、ペアリングは周波数が20Hzより低下しない範囲で軽量化を行い、慣性モーメントの低減をはかった。

図11には実機によるアームの振動数の実験値が示されているが、X軸ペアリングにBを使用した場合の周波数は23Hzであり、Z軸の位置決めは良好であった。また、オーバースペックでない適切なペアリングを選ぶことでコストダウンにもつながった。

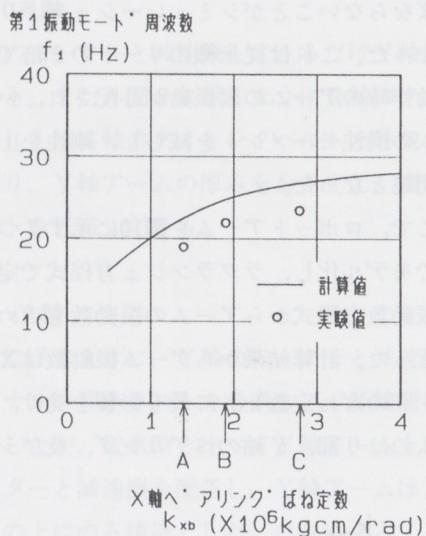


図11 アームの振動数とX軸ペアリングのばね定数

4. 制御ソフトにおける高速化

4.1 ゾーンコントロール

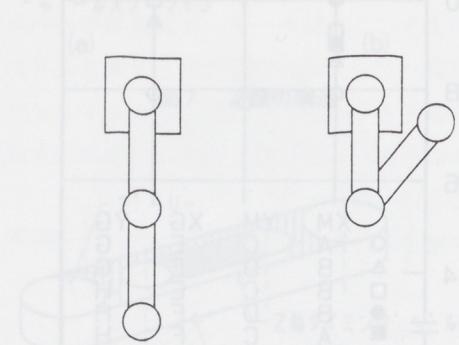
水平多関接型ロボットでは、Y軸アーム位置によりX軸まわりの慣性モーメントが大きく変化する。図12に示すように、慣性モーメントが最大に

なるのはY軸アームがX軸アームに対して真直ぐな場合であり、逆に慣性モーメントが最小になるのはY軸アームを最も内側に曲げた場合である。

従って、モーターの最大電流値と減速機の許容トルクを一定とすれば、Y軸アームが内側へ曲げられるほど慣性モーメントが小さくなるので、大きな加速度を出すことができる。ただし、水平多関接型ロボットでは、動作中にアーム自身の慣性モーメントによって生じる有効慣性力以外に、X軸とY軸が干渉し合うために生じる相互慣性力、さらに遠心力やコリオリ力を受けるので、これらの影響を考慮して出し得る加速度を正確に計算で求める必要がある。もし、有効慣性力のみを考慮して計算した加速度を用いると、動作中に軸に相互慣性力等による予想外のトルクが生じ、減速機の破損、モーターのオーバーロード等のトラブルが発生する場合があるので注意を要する。

さて、ロボットの制御では、アームの移動前にあらかじめ上記の計算によって求められた動作パターンに合った加速度値を拾い出して、アームを高速動作させている。

この方法をゾーンコントロールと呼んでおり、水平多関接型ロボットのサイクルタイムの短縮に大きな効果を上げている。ゾーンコントロールの効果はY軸アームが曲げられるほど、大きくなるが、通常使用される条件下ではサイクルタイムが10~20%程度短縮される。



(a) 慣性モーメント最大姿勢 (b) 慣性モーメント最小姿勢
(動作範囲内)

図12 慣性モーメントの変化

4.2 位置決め時間の短縮

一般に、生産現場でロボットが使われる場合は200mm以下の短距離移動を行なわせることが多い。この短距離移動を繰り返すような使い方においてロボットのサイクルタイムを短縮するには、位置決め時間を短くすることが重要である。

ロボットの位置決め時の挙動を詳細に検討すると、目標点の近傍で指令速度に対するモーターの追従性が悪くなることが実験的に確認された。これはメカ系の摩擦が悪影響を与えていたためと考えられる。

そこで、メカ系の摩擦を見込んだ指令速度を従来の指令速度に上乗せすることにより、すばやい位置決めを可能とした。この方法をクイックポジショニングと呼んでおり、これを実行するためのコマンドが用意されている。クイックポジショニングを使用することにより、ロボットのサイクルタイムが20~30%程度短縮できる。

5. おわりに

ロボットの構造の最適化と制御ソフトにおける高速化によってYK640では標準サイクルタイムは0.75秒を出すことができ、当初の目標を達成した。

今後の課題としては、標準サイクルタイムのさらなる短縮をめざして、

- (1) 慣性モーメントの低減
- (2) 最高速度のアップ
- (3) 位置決め時の残留振動の低減

が上げられる。以下に、各課題における現在の動向を述べる。

(1) 試作でY軸アーム部品のアルミ化の徹底、薄型減速器の採用によるY軸アームの軽量化、及び、ポールスライドの軽量化によってY軸アームの慣性モーメントを30%低減し、標準サイクルタイムは0.6秒台を出すことができるようになった。コストの検討と耐久試験の結果を見て生産移管する予定である。

(2) 最高速度のアップはロボットの長距離移動時のサイクルタイム向上につながる。ただし、DCモーターの定格回転数以上の運転はブラシ寿命の低下をもたらすので、どれくらいの回転数まで実用上問題がないのか現在評価中である。また、水平多関接型ロボットACモーター化も平行して行っている。

(3) 高剛性減速機の採用とアームの慣性モーメントの低減によりアームの固有振動数は従来のロボットに比べかなり向上している。しかし、モーター電流と減速機トルクが許容値内にありながら残留振動により加速度が上げられないといった問題はまだ残っており、特に短距離移動時に顕著である。

図13にロボットアームの振動数方程式を解いた計算結果を示す。f₁は第1振動モード周波数、θはX軸アームとY軸アームのなす角度、Wは負荷重量である。これより振動数はわかるのだが、その減衰性は従来機のデータとの比較で予測するのがせいぜいである。また、制御系の影響も考慮されていない。

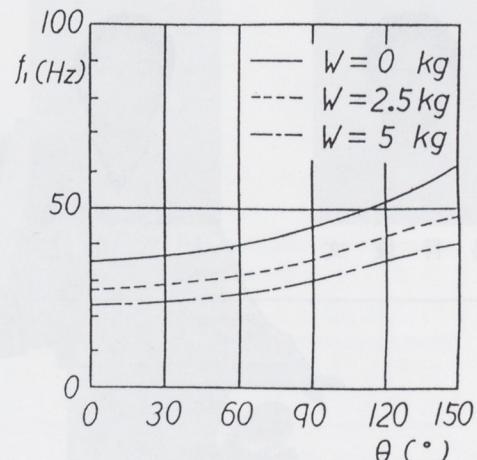
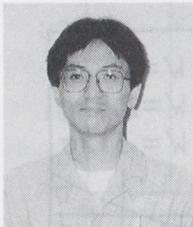


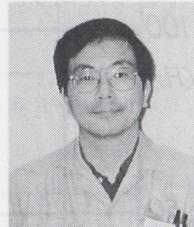
図13 アーム位置によるアーム振動数の変化

現在、X軸とY軸のアームの運動方程式とモーターの運動方程式を連立して解いてアームの振動の様子をシミュレートするプログラムを開発中である。図14に位置決め時におけるアームの振動の計算結果を示す。 θ_1 , θ_2 はX軸, Y軸の出力軸の回転角, Φ_1 , Φ_2 はX軸, Y軸のモーターの回転角, δ はアーム先端における位置決めポイントとの偏差を示している。この計算ではモーターの運動方程式中に制御モデルをとり込んでおり、位置ループゲイン K_p と速度ループゲイン K_v による振動の減衰性までも調べることができる。このシミュレーションの完成度を上げて残留振動を抑える制御方法を見つけようとしているところである。

■著者■



馬 目 俊 文



木宮祐三

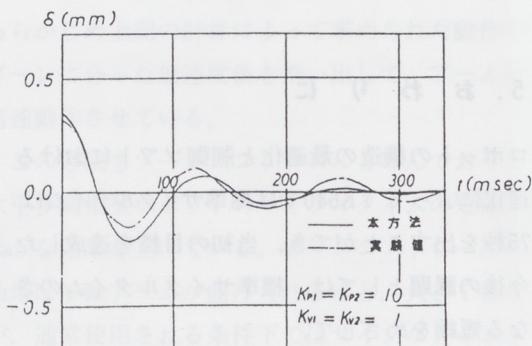
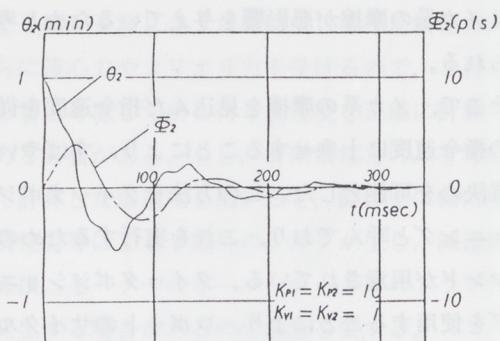
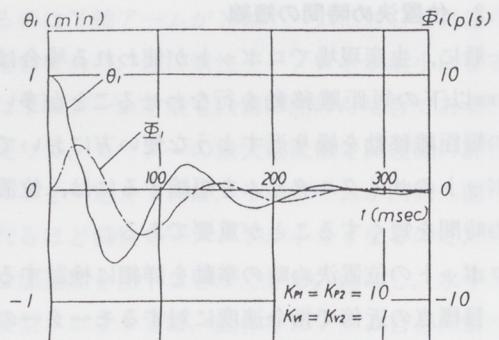


図14 アームの振動のシミュレーション結果