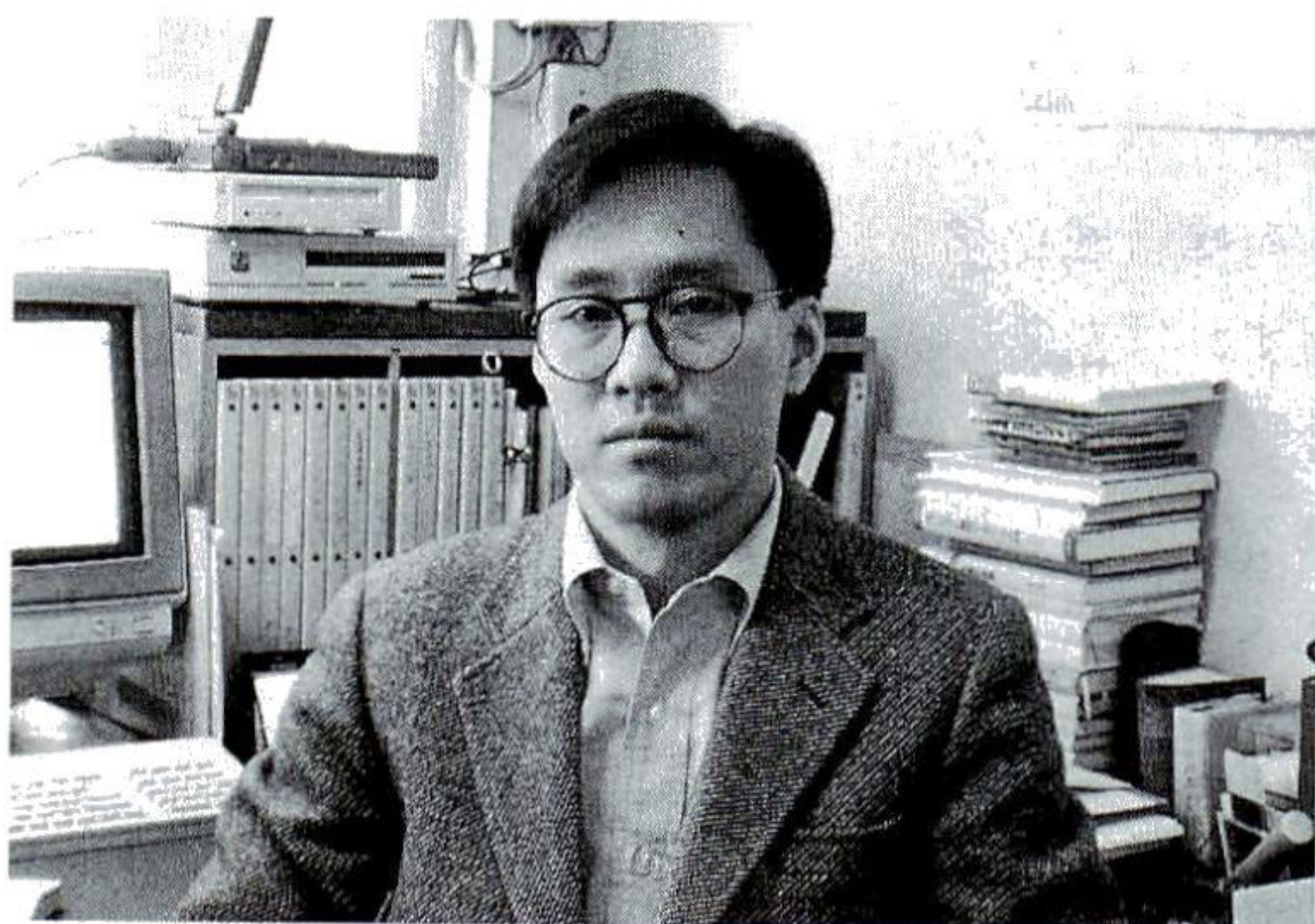




よりよい乗り心地を目指して 松尾研究室～制御工学科



松尾 芳樹 助教授

皆さんはアクティブサスペンション（ここではACSと省略）という言葉聞いたことがあるでしょうか。最近人気のF1や高級自動車に付いていることもあるので知っている人も多いかと思います。今回は、このACSの従来とは別の用途での使用を研究なさっている松尾先生取材させていただきました。また、4年生での研究室所属の際、学生はどのような研究をするのでしょうか。その一例として、松尾研に所属している学生の研究内容も紹介します。



アクティブキャブサスペンション

普通の自動車には、地面からの振動のショックを和らげるため、バネ等のサスペンションが使われています。これに対して最近では、外から力が加わった時だけに伸び縮みするのではなく、外力が加わらなくても自ら自由に伸縮することができるバネなどの、ACSを使っている車もあります。これらの車では、主に走行性が良くなるよう姿勢制御をする目的でACSを使っています。たとえば、急ブレーキをかけた時に車体が前方へ沈み込むのを防いだり、凹凸の激しい道路を走った時に車体が飛び上がってもタイヤを地面に密着させ続けるために、タイヤと車体の間のバネを伸縮させるといった具合です。

しかし松尾先生は、より積極的にACSを使おうと研究をなさっています。具体的には、トラックの乗り心地を良くするためにキャブ（運転台）の振動を減らす方法として、ACSを使ってみようと考えています。

運搬用の長距離トラックは1人で何時間も運転するため、あまり振動が多いと疲労がたまり事故が起こりやすくなります。これを防ぐためには、たとえ車が地面の凹凸に沿って激しく振動しても

キャブは振動しないように、キャブをフレームと逆に動かしてやればいいのです。

キャブの振動を減らすだけならば、キャブにバネを付ければいいと考える人もいるかも知れませんが、ところが、バネのような外力だけに反応して動作する受動素子では、構造上の制約があり十分な乗り心地が得られないのです。例えばバネの場合、固すぎると振動を十分に吸収することができないし、やわらかすぎると人が乗っただけでバネが縮みきってしまって、これもサスペンションの

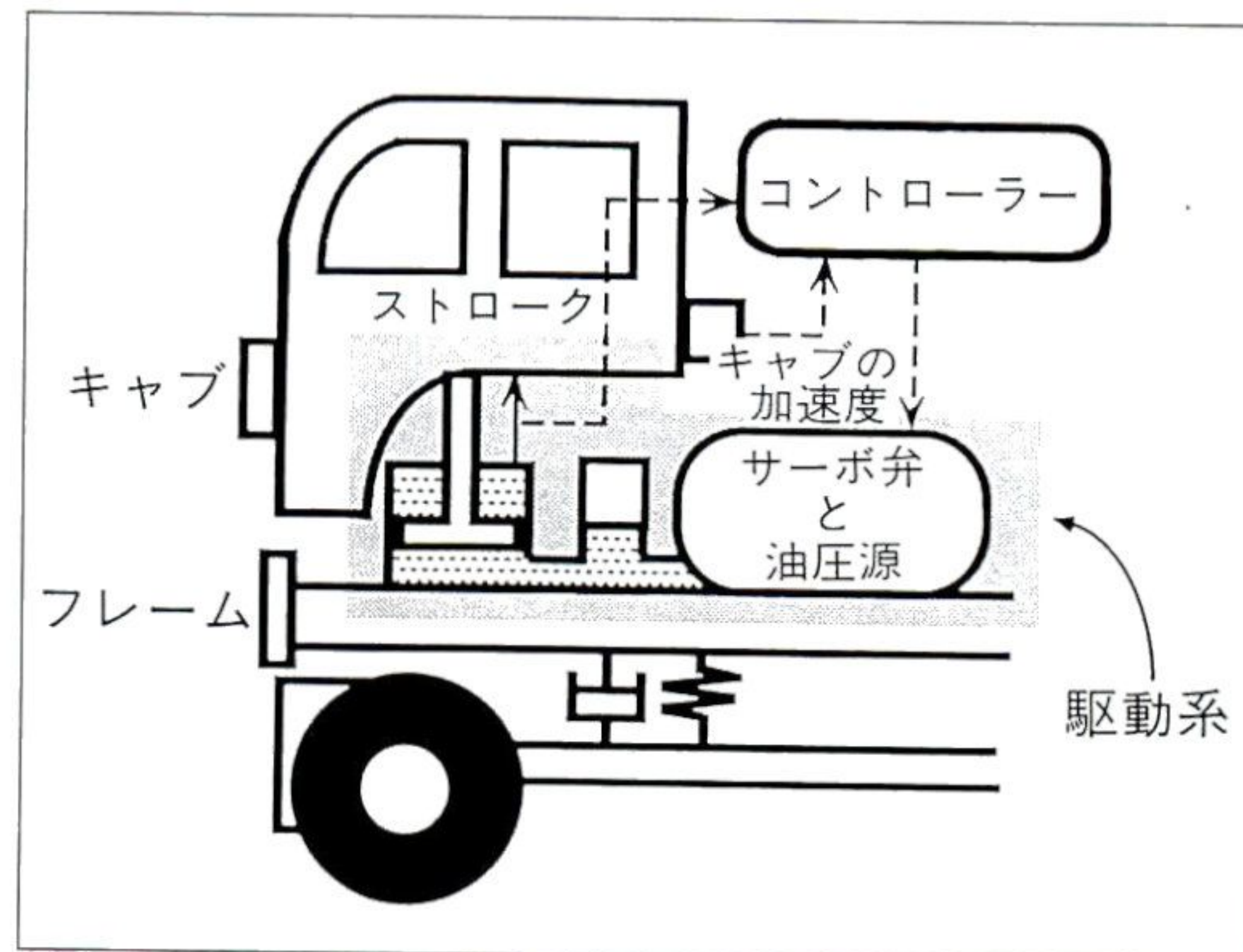


図1 アクティブキャブサスペンションの構成

意味がなくなってしまう。その点、ACSならば自在に固さを変えることができます。

また、やみくもに振動を減らしてもしかたがありません。人間には受振感というものがあり、同じ振幅でも周波数によって感じ方が変わります。一般に、人間は4~8Hz付近の振動に対して最も敏感とされているのですが、受動素子ではどうしてもこの周波数の振動を都合良く減らすことができません。以上のような理由で、車の乗り心地を良くするためにはACS、いわゆるアクティブキャブサスペンションが必要となります。

先生は、現在すでに乗用車の姿勢制御用に実用化されている、伸縮自在の油圧式バネをモデル化して、 H_{∞} 制御理論^{*1}を用いてコンピュータ上でシミュレートしてみました。また、実験装置で実験も行いました。すると、受動素子だけではどうしても不可能であったこの周波数の振動を、うまく減らすことに成功したのです。

この油圧式バネをキャブに取り付ければ当初の問題は解決されるように見えます。ところが、このバネを制御するための部品は1個100万円以上もするため、キャブの4隅にとりつければ、乗用車ならその値段で買えてしまうのです。そのためこのままでは、とても商品化することはできません。しかも、このバネは油を使っているためにどうしても反応に遅れが出てしまいます。

こうした問題を解決するために、松尾先生は油圧式バネ以外の装置を使ってみてはどうだろうかと考えました。今までは、油圧でなければ数百キロもあるキャブを支えることはできないという先

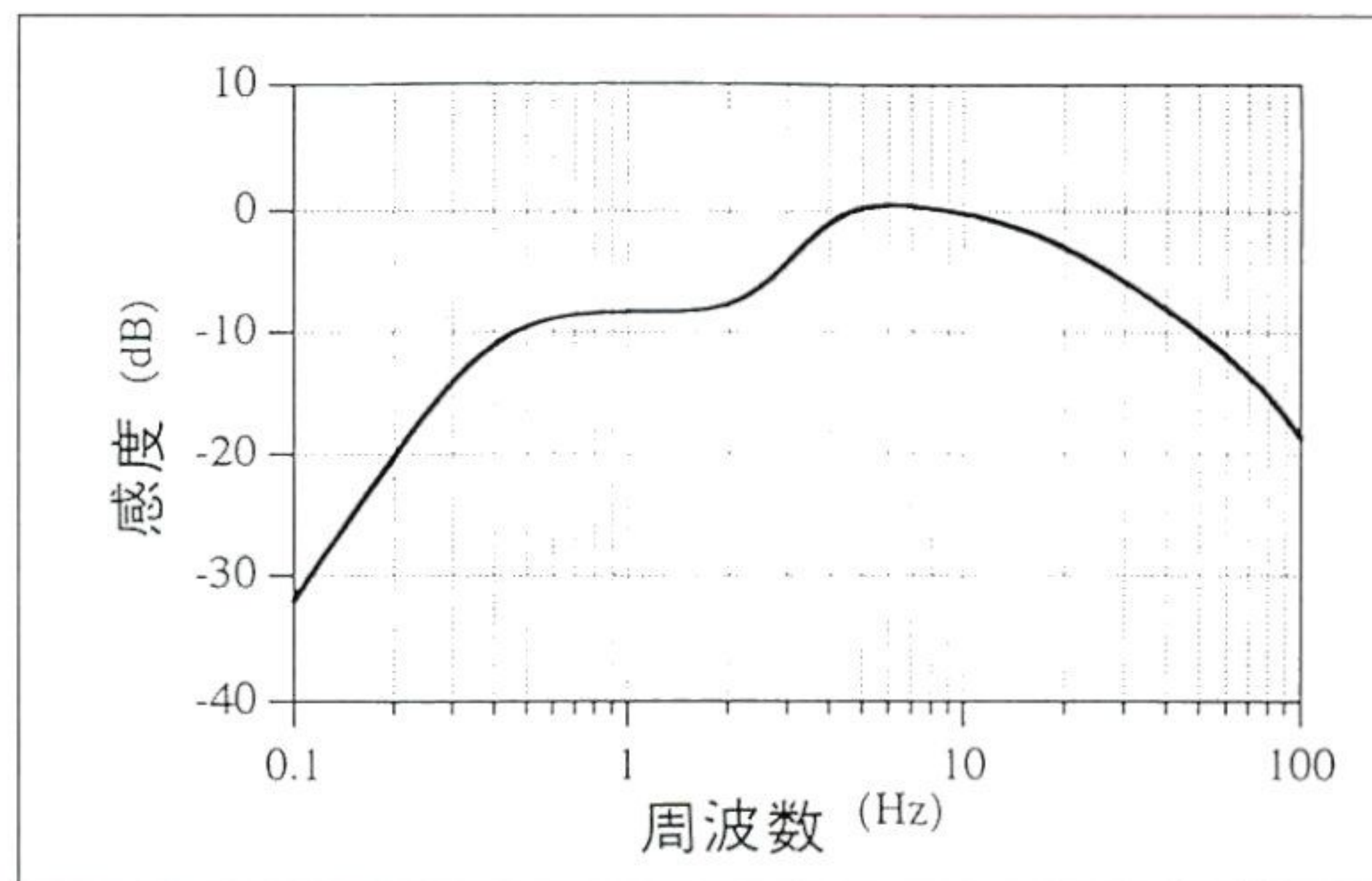


図2 人の上下方向の受振感特性

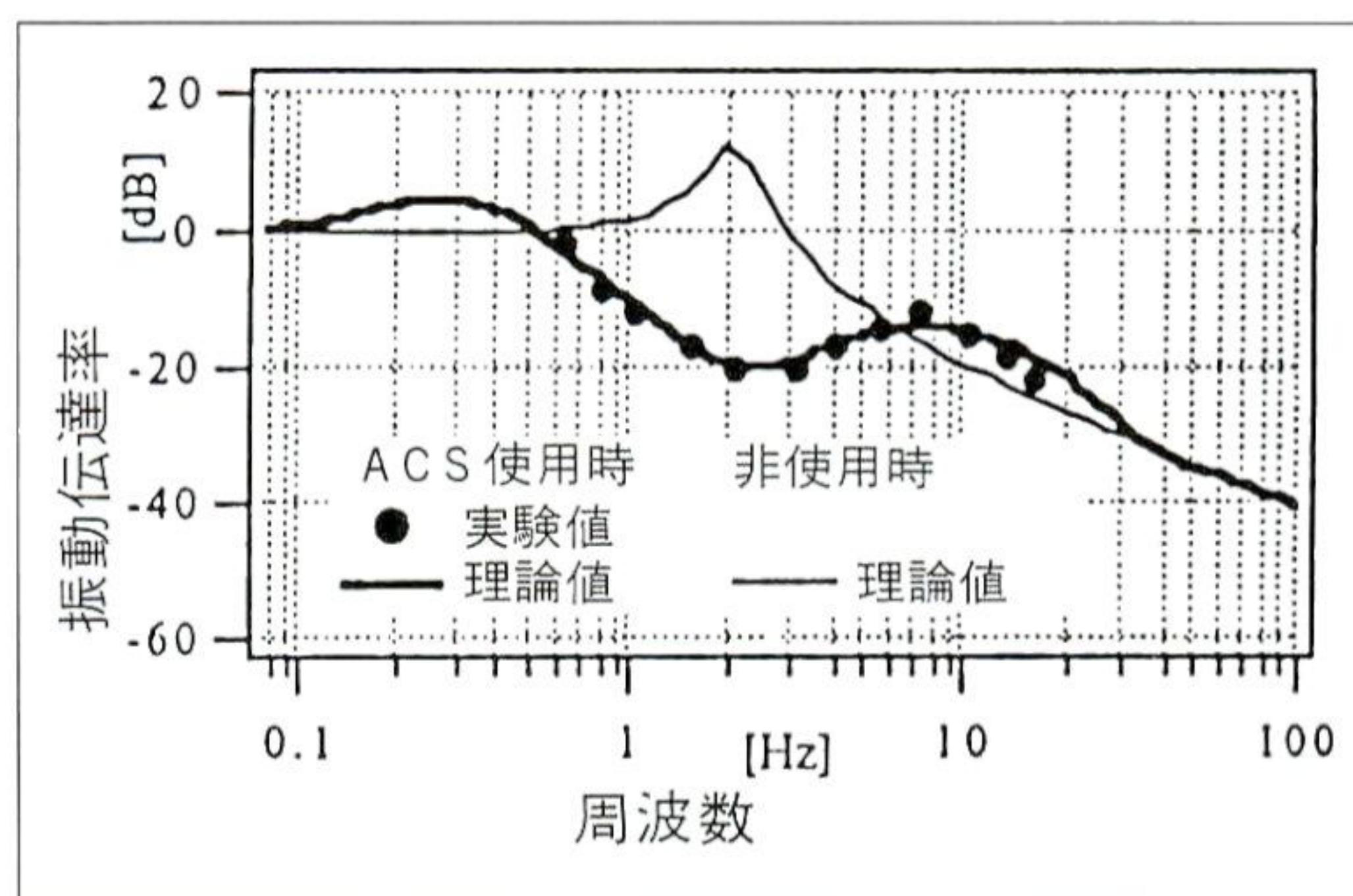


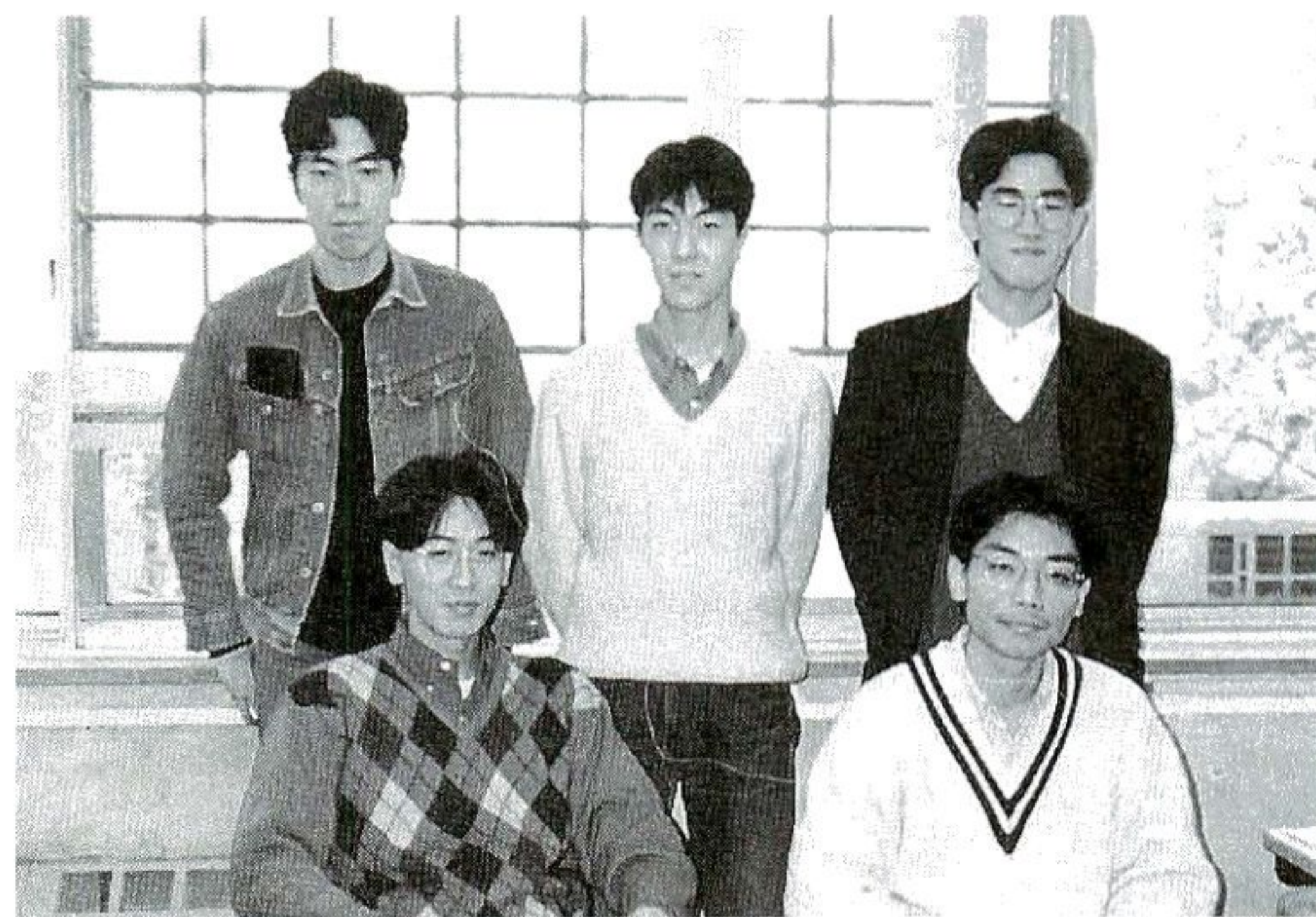
図3 振動伝達率の周波数特性

入観がありましたが、油圧式バネの代わりに電動機（モーター）を使ってみることにしたのです。コンピュータでシミュレートしてみると、100W程度と手ごろなモーターでも十分に支えることができるうえに、油圧式バネを使った時とほぼ同等の効果を得られることがわかりました。また、モーターを使えば安くて反応の早いACSを作ることができます。そこで現在は、モーターのACSを使った実物の模型を作り実験を行っています。



学生はどんな研究をしているのだろう

晴れて4年生になって研究室所属をすると、一人ひとりが卒業研究のテーマを決めて研究活動を行います。92年度の松尾研では5つのテーマが挙げられ、6人の学生がそれぞれ話し合っ自分のテーマを決めました。これらのテーマの中には、先生がいま研究中のACSに関するものも含まれていますが、今後研究していこうと予定している内容のものもあります。今回は、学生が研究をしている内容の一例として、その新しいテーマを選出した金井さんと井手さんに、お話をうかがってきました。



松尾研究室のみなさん

〈自律分散制御〉

多関節アームのモーターのように制御対象が複数個ある時、従来は1つのコンピュータで全てのアクチュエータ^{*2}を一括して制御していました。つまり、個々のアクチュエータへの信号線が全部、中央コンピュータから出ていたのです。ところがこの仕組みでは、長い信号線が必要なために重量が重くなる、コンピュータがひとつしかないのでこれが壊れるとシステム全体が動かなくなる、などの問題があります。

これを解決するための研究として、金井さんは「インテリジェントアクチュエータとその自律分散制御のための基礎的研究」というテーマを与えられました。学生の自由な発想を活かせるよう、先生はあまり細かい指示を出さなかったため研究対象も指定されませんでした。そこで、金井さんはモーターと制御装置からなるアクチュエータを複数個つなぎ、所定の動作を行わせるモデルを考えました。それぞれのアクチュエータには自分とその前後のモーターの角度しか知らされません。このような仕組みにすると、長い配線や中央コンピュータを作る必要がなくなるために、前出の問題が解決する上、同じ型の物を組み合わせることになるので汎用性も出てきます。

まず最初に考えたことは、アクチュエータ全体をまっすぐに並ばせることでした。これは一見、簡単そうですが、例えばアクチュエータが1つ壊れたとしても全体的にはまっすぐに並ぶようにしてはいけない、という条件が入るととたんに難しくなってしまいます。なぜならば、それぞれのアクチュエータは局所的な情報のみから全体の状態を把握し、自分のモーターの角度を決めなくてはならないからです。この点は、試行錯誤を繰り返した後、それぞれのアクチュエータにポテンシャル関数を持たせ、その値が小さくなるようにモーターの角度を変えさせることによって解決しました。

私たちが取材した時には、ちょうどコンピュータ上でのシミュレーションに成功し、壊れたアクチュエータがあったとしても、図のように全体としてはまっすぐ伸びるようになっていました。この後はシミュレーションが本当に正しいか調べるため、実物を作って実験を行う予定だそうです。

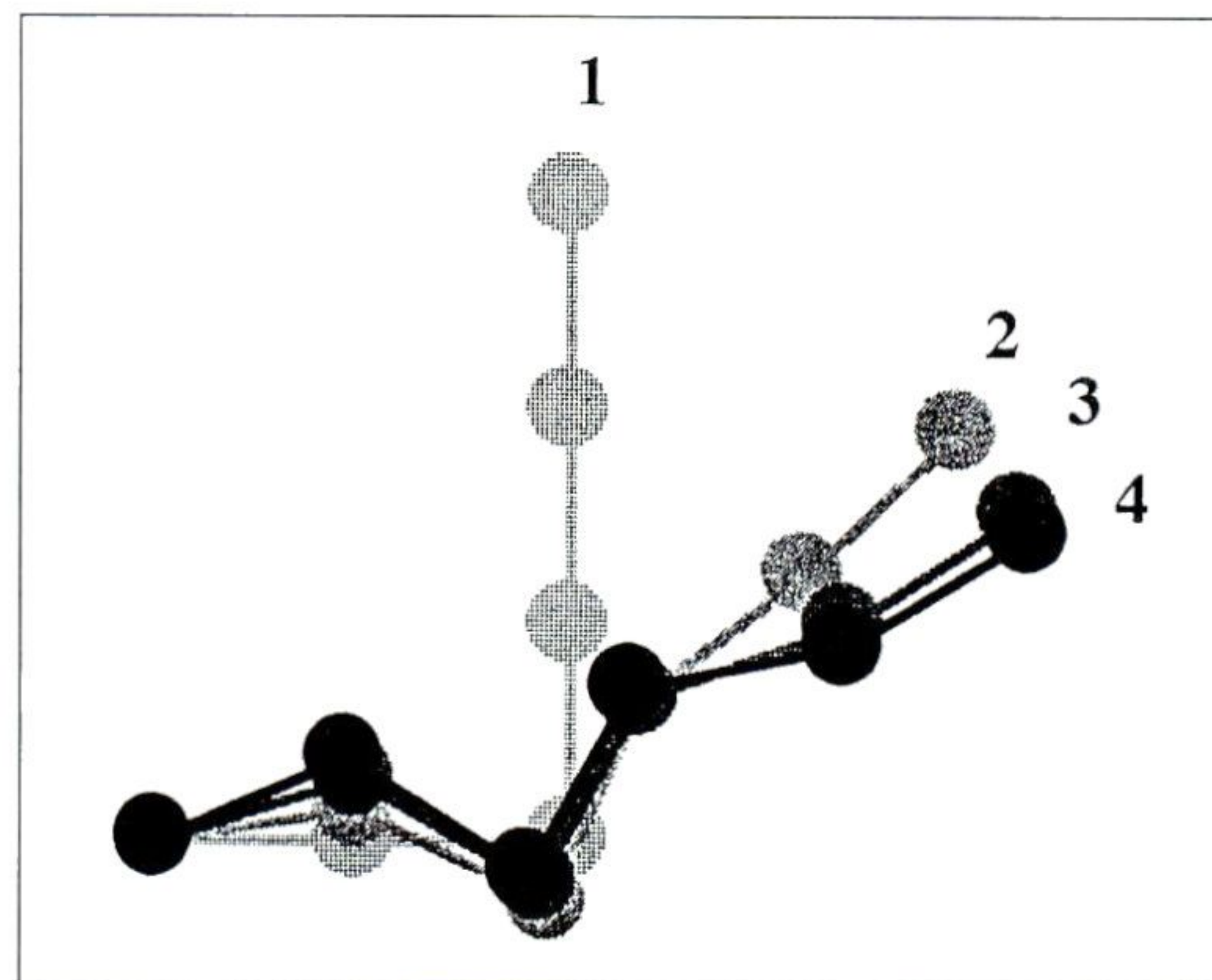


図4 アクチュエータが伸びていく様子

〈マン・マシン・システム〉

現代の機械システムでは人間が疎外されているのではないかと感じていた井手さんは、「周波数領域上での設計仕様に基づくマン・マシン制御系設計」というテーマを選びました。

最近ではいろいろな機械が高度化し、自動化されていますが、自動車の運転などのように、人間が操作しなくてはいけない機械も数多く存在します。ところが従来は、機械が正常に動作することだけを目的として設計していたために、人間がその機械の特性を理解して、それに合わせて操作しなくてはなりません。したがって、作業が単調すぎて退屈したり、複雑すぎてストレスがたまったり、ということがしばしば起きました。

そこで人間をシステムの一部と考えて、このシステムが正常に動くように設計を行おうという考えが生まれました。このように人間を含んだ機械系がマン・マシンです。人間が入ったシステムを正常に動作させるためには、人間の性質を考慮に入れて、過度の緊張を要求しないと同時に、操作するのに必要な最小限の緊張のレベルを維持できるように設計しなければなりません。また人間には個人差や、上達度の違いがありますが、誰が操作しても同じ結果が得られるようにする必要もあります。

井手さんは、 H_{∞} 制御理論を使って、マン・マシンを設計する方法について研究をしています。構造が単純な機械を使えば人間の特性が顕著に現れて研究しやすいので、クレーンモデルを使うことにしました。これは台車からぶら下がった振り

子の先を、連続的に移動する目標に合わせ続けるように台車を動かすことを目的としています。今までのように、人間からの入力通りに動作するよう設計された機械ならば、人間の動きが直接、台車の動きに反映されるために、人間が機械に追い付いていけなかったり行き過ぎたりすることがあります。この問題を解決するために、人間からの入力を一度マン・マシン・システムのコントローラに入れ、そこでデータを処理した後に台車を動かす機械に出力することでマン・マシン制御系を構成します。このようにすると、人間の動きから機械が目的を察知して、振り子の先端が目標に合い続けるように台車を動かすことができます。

コンピュータでシミュレートしてみると、コントローラを用いない時は振り子が行き過ぎたり出遅れたりするのに対して、用いた時は激しく動き回る目標にピッタリと追い付いていき、格段の差が現れました。今後は人間の伝達関数^{*3}の測定、コントローラの設計、コントローラを用いた時と用いない時の比較を行っていく予定だそうです。

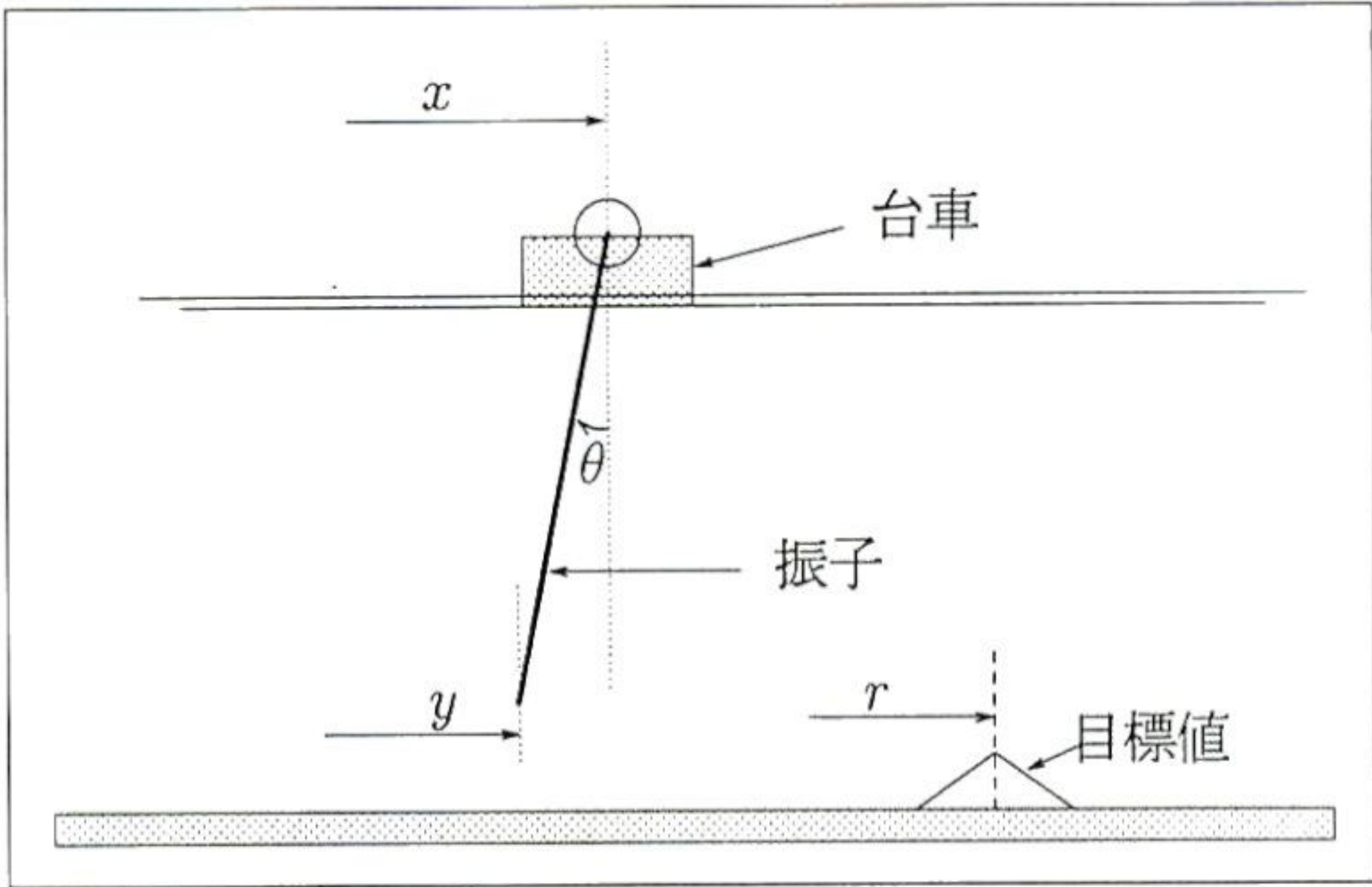


図5 クレーンのモデル

- * 1 H_{∞} 制御理論(エッチインフィニティ)
ごく最近の制御理論の1つで、多入力、多出力の制御系における、周波数ごとの応答を考えることによって制御系解析、設計を行う理論
- * 2 アクチュエータ
機械装置稼働部を駆動するために、力やトルクを発生する装置の総称で、サーボモーター、油圧シリンダー、空気圧シリンダーなどがある
- * 3 伝達関数
この場合、目にどのような映像が映ると手がどのように動くかを知るための数式

🔍 今後はどんな研究をするのだろう

松尾先生がACSの研究を始めたきっかけは、もともといすゞ自動車での研究をしており、そのメインスタッフをしていた方が研究生として来たためでした。当時の松尾先生は、機械に負担を与えない波形を作り出す、インバータ電源の研究をしていたのですが、その考え方がACSに通じるとのことで、いすゞとの共同研究を始めたそうです。そこで先生は理論を担当して、大がかりになりがちな実験はいすゞが行っています。油圧式バネでの実験はすでに行われており、ACSを使った時と使わない時とでは歴然とした差が現れました。ACSの研究はほぼ大詰めを迎えており

いすゞでは近い将来、このACSを用いたトラックの発売を検討しています。

人に優しい機械を作りたいと思い、トラックにACSを用いる研究を始めた松尾先生ですが、次に、より積極的に人に優しいマン・マシン制御系の研究をしようと考えました。今回取材させていただいた、自律分散制御とマン・マシン制御系は先生がこれから研究しようと考えている分野なので、まず発想の柔軟な学生に自由に研究させて、将来どんな研究をすることができるか、今はその可能性を見ている状態です。

今回は、皆さんが将来実際に体験することになる卒業研究が、どのようにして行われているかわかる内容を目指してみました。整理整頓がいきとどいた学生室を見ると松尾先生の几帳面な人柄がここにも現れているように思います。

忙しい時間を割いて取材に応じて下さった松尾先生と、金井さん、井手さん、そしてこの記事

書く上でさまざまなお手伝いをして下さった稲葉助手に感謝すると共に松尾研の益々の発展をお祈りいたします。

(大谷)