解説

位置サーボ制御教材としての木琴自動演奏器の製作

Development of an Automatic Playing System of a Xylophone for a Teaching Material of a Servo Positional Control

川崎 直哉^{*1} 野村 弘^{*2}

Naoya Kawasaki^{*1} and Hiroshi Nomura^{*2} ^{*1}Joetsu University of Education ^{*2}Kochi National College of Technology

1. はじめに

最近では中学校などの教育現場においても、自動制御をとりあげる機会が増え、それにともなって教員養成系大学でも制御工学の概要を学習する必要性が増加している。学習内容の理解を助けるためには、適当な教材・教具が欠かせないため、教育系分野でもこれまでに幾つかの制御システムの教材・教具が研究・開発されているが、単に制御性能が高いというだけではなく、視覚・聴覚などに訴え、見るものの興味・関心を引くことができれば、教材としてさらに望ましい。

このような観点から、コンピュータによる外部機器の制御をテーマとした教具として、直流モータと木琴を使用した木琴自動演奏器の製作を行なった。開発した木琴自動演奏器は、音という感覚的にわかりやすい媒体を通じて制御の効果が直接に評価できるようなメカトロニクス的な制御システムであり、その原理と構造はすぐ理解できるものとなっている。良い演奏のためには各音の間の一定時間内に高速で、なおかつある程度の精度の位置制御を行なう必要があるが、実際の自動制御の概要を理解するための適当な教材となっておりと思われる。

演奏の能力という点のみから考えると、ピアノの自動演奏機構のように各鍵盤に対してそれぞれ鍵打ち機構を配置して、高速での位置制御の必要性をなくすることが有利であるが、この自動演奏器は上述のように自動制御の教材として開発したため、演奏能力にはある程度の制限がある。実際、テンポのあまり速い曲は演奏が難しいが、その代わり高速での位置移動を目で楽しむことができるため、視覚的にもアピール出来るものとなっている。

図1 木琴自動演奏器の外観

図2 木琴自動演奏システムの構成

2. 木琴自動演奏システムの構成

図1は製作した木琴自動演奏器の外観、図2はその構成概要(マレット1本分)である。図1で手前側は高音部分(C3~C5)、奥側は低音部分(C1~B3)となっている。本システムではパソコンからの信号で各演奏器当たり2本のマレット(バチ)を高速で移動し、曲を演奏する。この場合、主な動作はマレットの位置制御と鍵打ち動作の2つである。マレットの移動にはDCモータを用いた位置サーボ制御系を構成しており、パソコンからの目標値(音階データ)に追従するようにその位置を変える。一方、鍵打ち動作は小型模型用DCモータ(マブチモータ)をパルス駆動することで実現している。人間が木琴を演奏する場合2本の腕を用いるように、本演奏器でも2本のマレットで演奏するものとした。以下、主要な各部分の働きと構成を簡単に述べる。

2.1 木琴自動演奏器本体の概略

木琴自動演奏器本体(低音部分)の概略図を図3に示す。

原稿受付 1995年12月1日

キーワード: Automatic Playing System, Xylophone, Servo Control System, Electromechanical Teaching Material

^{*1}〒943 新潟県上越市山屋敷町1

^{*2}〒783 高知県南国市物部字新開2

^{*1}Yamayashiki, Joetsu-shi, Niigata

^{*2}Monobe, Nangoku-shi, Kochi

図3 木琴自動演奏器本体の概略図

図4 台車部分の外観

自動演奏器本体は、マレットを乗せた台車などを取り付けた2つの独立したフレームの間に挟みこまれるような形で、中央部に木琴（正確にはマリンバ）を配置したものである。3年ほど前に製作した1号機では、教育用の木琴（ヤマハ木琴 No. 185）を使用したため、音域が狭く（G1(ソ)～C4(ド)30鍵盤）各鍵盤の幅も狭いため、全体の長さがそれほどではなく1組で構成できたが、今回製作したマリンバによる2号機では全体の長さが長くなったため、低音部分と高音部分の2組構成とした。マリンバ（以下、木琴と呼ぶ）は主音の段と半音の段の2段組になっているものをそれぞれ一度分解して、主音の間に半音を組み込んで一列とし、それを低音部分（C1(ド)～B3(シ)24鍵盤）と高音部分（C3(ド)～C5(ド)25鍵盤）に分けたものである。低音部分24鍵盤の全長は1250[mm]、最大幅は435[mm]、高音部分25鍵盤の全長は1110[mm]、最大幅は300[mm]となっている。

フレームは、一般に販売されており、入手が容易な穴あきL型鉄製アングル（30[mm]×30[mm]）を使用した。図3のように、マレットを取り付けた台車を木琴の両側に配置し、台車は図の左側に配置されたDCモータ（神鋼電機製SPM 2035 F 24 V）に取り付けられたアルミ製プーリーに巻かれたワイヤーによって引っ張られる。台車は直径14[mm]の丸棒のステンレスシャフトによって貫かれており、また端点部分をフレーム上面で支えられているため、シャフトに沿って移動する。台車の位置は、DCモータに台車駆動用プーリーと同一軸に取り付けられた接触型10[kΩ]10回転のポテンショメータ（栄通信製22 HP-10）によって検出される。

台車の上に乗っているマレットは、模型用モータに模型用のギアボックスを介して取り付けられており、モータが回転することにより鍵盤に打ち付けられる。マレットは、

引っ張りコイルバネによりモータの回転と逆方向に常に引っ張られており、モータの駆動が中止されればバネによってマレットは元の位置へ引き戻される。台車の移動特性を良好にするためには、台車を軽量化することが効果的であり、そのために模型用モータおよびギアボックスを用いている。マレットを含む台車の総重量は約190[g]であり、1号機に比べ移動特性がかなり改善された。なお、鍵盤を打ち付けるときの強さは後述の様に模型用モータの駆動時間で決定される。図4に台車部分の外観を示す。

2.2 システム制御部

木琴演奏器と信号をやり取りするパソコン（NEC製PC-9801）と拡張用スロットに差し込んだ自作のインターフェースボードから成る。ボードは2個の8ビットパラレルデータ入出力用LSI 8255 Aと4個の8ビットD/AコンバータAD 7523、1個の8ビットA/DコンバータADC 0809などから構成されている。ボードから出される制御信号は、マレットがたたく木琴の鍵盤の指定（位置の目標値）と、マレットがたたく強さと回数の指定の2系統である。各自動演奏器ごとに、位置の目標信号は8255 AのA、BポートからD/Aコンバータを通してアナログ電圧としてサーボ・アンプへ、鍵打ちの強弱の指定命令は8255 AのCポート（上位、下位4ビットずつ）を通してデジタル値のまま鍵打ち回路へそれぞれ出力される。サーボ・アンプと鍵打ち回路は、この制御信号に従って木琴自動演奏器を移動させることになる。一方、A/Dコンバータを通して現在のマレットの位置がパソコンに取り込まれ、それを基に後述のように制御信号を出すタイミングを決定している。

2.3 位置制御部

パソコンからの音階データ（位置データ）に対応する位置へマレットを移動させるサーボ機構であり、これの速応性、安定性は速いテンポの演奏を可能にする重要な要因である。パソコンより8ビットD/Aコンバータを通して出力される位置データ（アナログ電圧）と、ポテンショメータによって検出される実際の位置データ（アナログ電圧）との差電圧が0となるまでモータが回転する基本的なサーボ系を、アナログ回路のみで構成している。サーボ系全体では、D/Aコンバータ1[bit]当たりの台車の移動量は平均約6[mm]と、D/Aコンバータが8ビットであるためかなり粗いが、木琴の鍵盤の幅が最小でも約40[mm]あることから、実用上は全く問題がない。なお、電力増幅部にはパワーオペアンプ（LM 12 CL）を用いてDCモータを駆動している。電力効率や発熱の点からPWM制御などが有利であるが、自作による回路設計・構成の容易さからパワーオペアンプのみでモータを駆動している。

2.4 鍵打ち動作部

パソコンから出力された鍵打ちの強弱の指定命令は、イ

インターフェース上の 8255 A の C ポートから鍵打ち回路へ出力される。具体的には、C ポートの上位 4 ビットのうちの下 2 ビットと下位 4 ビットのうちの下 2 ビットを用いて、ワンショット・モノステーブルマルチ (74 LS 123) に加えられる。LS 123 では時定数の異なる抵抗・コンデンサを外付けすることによって、H レベル状態の時間が異なる 2 つのワンショットパルス発生回路を構成している。鍵打ちの強弱に応じて一方を選択し、パソコンから加えられたトリガパルスによって発生する長さの異なる 2 種類のワンショットパルスを小型模型用 DC モータに増幅して加え、モータの導通時間の違いによりたたく強弱を作り出している。実際には、モータの起動特性をあげるために、定格電圧 3[V] の模型用モータを、電圧約 10[V] で数 10[ms] 駆動しており、モータの耐久性・寿命に問題を残している。

3. ソフトウェア

木琴自動演奏システムのソフトウェアは、当初、NEC 社の N 88-BASIC を用いて製作した。具体的には、①演奏する曲の音符データを保存するソフトウェア、②保存した曲のデータを読み込み実際に演奏を行なうソフトウェア、の 2 つのソフトウェアにより構成されている。1 つの音符は 1 つの音符データとして前者によって入力・保存され、後者を用いて選択された曲のデータ・ファイルから読み込んだデータを出力することにより演奏を行なう。1 つの音符データには、音階(位置)、音の長さ(音の長さ)と強さが必要である。音階については木琴の鍵盤が 24 個または 25 個であるから 5 ビット、強さについては 2 ビット(強弱)必要であるが、長さについては 1 データの長さを 8 分音符の長さとしてやることで見かけ上必要なくなる。トレモロについては、通常の最速テンポが 8 分音符であるところを 16 分音符で叩けるようにした。また両腕とも同時にトレモロを指定した場合には、32 分音符だけ両者のタイミングをずらして叩くようにしている。図 5 に音符データの入力パターンを示す。例えば、トレモロ演奏において C 2(ド)を強く打つ場合のデータは、C 2(ド)は低音部分の木琴の左から 13 番目の鍵盤であるので、11001101 となり、10 進数では 205 を入力することになる。なお、低音部分の木琴と高音部分の木琴のデータの間に数値的な区別はなく、入力・読み込みの際に低音部分・高音部分の順で交互にデータを入力・読み込みすることで、2 つの演奏器のデータの区別をしている。また、強弱を表す 2 ビットが両方とも 0 の場合は、台車の移動だけで鍵打ち動作は行なわないようにしている。

この N 88-BASIC を用いて作成したソフトウェアのほかに、ディスプレイ上の五線上にマウスを用いて音符をおいて入力し、パソコン内蔵の音源で音程を確認した後、直

図 5 音符データ 1 バイト分の構成

図 6 音符入力ソフト起動画面

図 7 位置制御部のブロック線図

図 8 位相進み補償回路

ちに演奏可能なソフトウェアも C 言語を用いて開発した。図 6 に起動画面の様子を示す。

4. 応答特性と改善

サーボ制御系は、安定性および速応性がよく、定常偏差を少なくするように慣性体を制御することを目的としているが、木琴自動演奏器の制御対象である台車も慣性が比較的大きく、望ましい応答特性を得ることが問題となった。位置制御系では位置情報のほかに速度情報のフィードバックを施すのが一般的であるが、ここでは回路構成の簡素化と基本的な制御回路に対する教材という観点から、速度情報を利用する代わりに、前置位相進み補償回路を施して特性の改善を試みた。機械系の摩擦を無視して、図 2 の位置制御部を補償回路も含めてブロック線図で表すと、図 7 のようになる。ここで位相進み補償回路 $G_c(s)$ は、図 8 で示すような伝達関数が

$$G_c(s) = \frac{K_c}{n} \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_1}}{1 + \frac{s}{n\omega_1}} \right), \quad \omega_1 = \frac{1}{C_1 R_1}, \quad n = \frac{R_1}{R_2} + 1 \quad (1)$$

で与えられる基本的なものである。システムのモデル化を行なった後、計算機シミュレーションを行ない、補償回路の効果を確認してから実際に補償回路を施した。この特性

図9 台車の移動特性

改善で一応の成果を得たが、実際には台車の慣性が大きく(約190[g]), またアンプのゲイン K_A を上げすぎた場合にはモータがチャタリングを起こすなどの問題があった。さらに実際の演奏では音(鍵打ち)と音(鍵打ち)の間に台車が移動を行なうため、離れた距離を台車が移動する時に一瞬音がとぎれる可能性があった。そこで、台車の移動速度を実用的に見て十分な大きさとしたところ、図9(抑制プログラムなし)のようなオーバーシュートが発生した。図から1オクターブの鍵盤数、すなわちC1(ド)からC2(ド)まで(約68[cm])を台車が移動するのに要する時間は0.5秒程であり(台車が鍵盤の範囲に入りほぼ安定するまで)、普通のテンポで曲を演奏するにはやや不満が残った。しかもオーバーシュートの発生量が鍵盤2本以上になっていたため、摩擦を増やすなどしてダンピング量を大きくしたところ、オーバーシュートはかなり抑制できたが、同時に移動速度も減少した。移動速度とオーバーシュートは、もともとトレードオフの関係にあること、台車の慣性がある程度大きいこと、速度情報を積極的に使っていないことなど、応答特性の改善はハードウェアに依存するところが多いが、ここではソフトウェアを用いて簡単に移動速度を十分な大きさに保ちながらオーバーシュート量を抑えることを試み、良好な結果を得た。これは、クレーンの振れ止め制御などにも応用されている実時間仮想目標値設計法[1]と類似なアイデアに基づいたもので、具体的には目標位置より近いある位置をあらかじめ仮の目標位置

として与え、台車が仮の目標位置に到達し、さらにオーバーシュートにより仮の目標位置を越えて最大距離に到達する直前で真の目標位置を与えるようにした。これにより、真の目標位置に対してはほとんどオーバーシュートが発生せずに、しかも台車の移動時間も最短とすることができる。このためには、移動中の台車の位置を把握する必要があり、前述のA/Dコンバータでこれを行なっている。この方法を適用した結果を図9(抑制プログラムあり)に示す。これによると、オーバーシュートが抑制されており、しかも台車が完全に停止するまでの時間が短縮されて、C1(ド)からC2(ド)まで(約68[cm])を台車が移動する場合でも、約0.3秒以内となっていることがわかる。

5. おわりに

教員養成系大学の学生のための制御教育教材として、木琴自動演奏器の製作を行なった。基本的には、古典制御理論の範囲内で理解できるため、自動制御の概要を理解する上で適当な教材となっておりと同時に、実機としての機能も十分備えていることが示された。実際の演奏では、小学校低学年用の曲(例えば、キラキラ星やおうまのおやこなど)であれば、トレモロ演奏を含め全く問題なくなめらかに演奏できた。一般的な曲もほぼ問題ないが、離れた音程の8分音符などが並んでいる場合には、テンポによっては若干なめらかさに欠ける感もあるが、マレットが移動する以上は避けられない問題であると思われる。また、鍵打ち部分は市販の模型用のモータおよびギアボックスを使用しているため耐久性に問題があり、軽量化を保ちつつ耐久性を向上させることが課題である。

参考文献

- [1] 那須, 住吉, 江上: “実時間仮想目標値を用いたクレーンの振れ止め制御”, 第34回SICE学術講演会予稿集, vol. 1, pp. 59-60, 1995.

川崎直哉 (Naoya Kawasaki)

1952年6月17日生。1975年、早稲田大学理工学部電気工学科卒業。1980年同大学院博士課程修了(工学博士)。1981年高知大学教育学部助手。1982年助教授。1990年上越教育大学助教授。制御系の安定化・設計法の研究に従事。計測自動制御学会、電気学会、システム制御情報学会、IEEEの会員。(日本ロボット学会正会員)

野村 弘 (Hiroshi Nomura)

1943年7月27日生。1966年、東京電機大学工学部電気工学科卒業。同年高知工業高等専門学校電気工学科助手。同助教授を経て、現在、同教授。工学博士。1973年アメリカ・ミズリー大学留学。1974年同大学電気工学科修士課程修了。半導体電力変換器の研究に従事。電気学会、IEEEの会員。