トルク制御可能なサーボユニットを用いた
小型ヒューマノイドロボット*友 國 伸 保^{*1}, 雑 賀 優^{*2}, 藪 田 哲 郎^{*3}

Compact Humanoid Robots Using Torque Controllable Servo Units

Nobuyasu TOMOKUNI^{*4}, Masaru SAIGA and Tetsuro YABUTA^{*4} Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Yokohama National University,
79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 240-8501 Japan

This paper describes a torque control servomechanism for small size robots. As a well known actuator for small size robot, a radio-control servomechanism has been used recently. These radio-control servomechanisms on the market has its position-controller inside. Robot system can use these servomechanisms as the open-loop type position servo system. Though, the controller has not the torque control ability which is essential function for robot system. Thus, we made a motor driver for the radio-control servomechanism which can control output torque by controlling current supplied to motor. In this paper, we confirm torque control function of the motor driver. Then, a small size humanoid was made up by use of the motor controller and radio-control servomechanisms, which has the torque control function. Experimental results show that smart compliance control can be realized. It gives softness of the robot movement, which such a small humanoid has not obtained yet.

Key Words: Robot, Humanoid, Biped Robot, Force Control, Compliance Control, Torque Controllable Servo-Controller

1. はじめに

現在, ヒューマノイドロボットを用いた研究が多く行われている。ヒューマノイドロボットは転倒の危険性が高く, 転倒した場合, ヒューマノイドロボット自体および周辺の環境に被害を与える可能性がある。このような被害はロボットのサイズが大きくなるに従ってより大きなものになる。そこで, 小型軽量のヒューマノイドロボットが実現できれば, 製造コスト, およびメンテナンスの手間をおさえ, 手軽に実験を行うことが可能となる^①。しかしながら, 小型のロボットでは, 装置を搭載するスペースが限られるため制御性能が高いアクチュエータおよびコントローラを組み込むことが困難であった。

小型軽量のロボットを構成するためのアクチュエータとして, コストパフォーマンスに優れた市販のラジオコントロール用のサーボモジュールを用いてロボットを構成した研究がみられる^②。しかしながら, これ

らのサーボモジュールではそのほとんどが位置制御のみであり, 速度制御, トルク制御が可能なのは少ない。また, 位置等のフィードバックを得ることが可能なサーボモジュールもあるが, 通信速度が遅く, 常時フィードバックを得ることは困難である。このような理由から研究用途で使用するためには機能が不足している。制御性の向上を目的に小型ロボット用のモータコントローラを独自に開発した研究も見られる^{③-⑤}, 使用されている通信規格の制限から, 通信速度の問題は完全には解決されていない。

ヒューマノイドロボットにおいて, 二足歩行時に積極的に外力を利用することにより, 低消費電力, あるいはより自然な歩容を実現出来ることが報告されている^⑥。また, このようなロボットを実環境で使用する場合, 重いものを押す, 倒れそうになった場合に受け身姿勢をとるといった周囲の環境との干渉を伴う作業を遂行できることが必須であり, このような場合には環境からの反力に応じて力制御を実現できることが必要である。

そこで本論文では, 小型ヒューマノイドロボットへの適用を目的として 24 軸のアクチュエータの位置, 速度, 電流の情報を 1ms 以内でフィードバック可能な

* 原稿受付 2004 年 7 月 20 日。

^{*1} 正員, 横浜国立大学大学院工学府 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)。^{*2} 横浜国立大学大学院工学府。^{*3} 正員, 横浜国立大学大学院工学府。

E-mail: tomo@yabsv.jks.ynu.ac.jp

小型モータコントローラの構成を提案する。ついで試作したコントローラを用いて電流制御性能に基づくトルク制御機能の確認をおこなう。

さらに、試作したコントローラを用いて身長 350mm、全身 22 自由度の小型ヒューマノイドロボットを製作する。製作したヒューマノイドに仮想コンプライアンス制御を適用し、外力に応じたコンプライアンス動作を実現した。本論文で提案する手法により、1ms 周期でのサーボモジュールからの情報の取得、外力に応じたコンプライアンス動作、および複数軸の連動動作を実現可能である。

2. モータコントローラの概要

力制御機能を有するモータコントローラの概要について説明する。モータコントローラの仕様はロボットの仕様から決定されたモータに対する制御性能を考慮して決定されるべきであるが、本研究では小型化の条件を満たすモータの選択肢が少なく、このため比較的高性能と思われる市販品のラジコン用サーボモジュールを制御対象として仕様決定を行った。

2.1 トルク制御の原理 図 1 にモータ正逆転回路 (H ブリッジ回路) に接続された DC モータ系の代表的構成法を示す。Tr1~Tr4 はトランジスタもしくは FET であり、Tr1,Tr4 を ON することで $i_a > 0$ 方向に電流が流れモータは正転トルクを発生し、Tr2,Tr3 を ON することで $i_a < 0$ 方向に電流が流れモータは逆転トルクを発生する。ここで、

τ_m : モータトルク

$\dot{\theta}$: モータ回転速度

R_a : 電機子抵抗

i_a : モータ端子電流

V_a : モータ端子電圧

V_p : 電源電圧

V_e : 逆起電力

K_τ : トルク定数

K_e : 逆起電力定数

D : パルス幅変調のデューティ比

上記パラメータを用いると、DC モータの性質は以

Fig. 1 DC motor with H-Bridge controller

下のように表される。

$$\tau_m = K_\tau i_a \quad (1)$$

$$V_e = K_e \dot{\theta} \quad (2)$$

$$V_a = R_a i_a + V_e \quad (3)$$

ここで、スイッチング周波数がモータの電氣的時定数より十分に小さいとすると、電源電圧とモータ端子電圧の間には次の関係が成り立つ。

$$V_a = D V_p \quad (4)$$

式 (2) ~ (4) を i_a について解くと、

$$i_a = \frac{D V_p - K_e \dot{\theta}}{R_a} \quad (5)$$

となる。従って、式 (1), (5) から、下記の式が求められる。

$$\tau_m = K_\tau \left(\frac{D V_p - K_e \dot{\theta}}{R_a} \right) \quad (6)$$

式(6)より、H ブリッジ回路のデューティ比 D を変化させることによりモータに流れる電流 i_a を制御し、モータの出力トルク τ_m を制御することが可能となる。

2.2 電流コントローラの概要 従来の電流コントローラでは、目標値として入力される信号はアナログ信号であり、モータに流れる電流 i_a と目標電流 i_d をアナログ回路により比較することによって電流が制御される。このとき、電流フィードバックはアナログ回路内のみで使用されることが多く、通常上位コントローラへフィードバックされることはない。本研究で

Fig. 2 Hardware structure of motor controller

Table 1 Specifications of current controller

PWM frequency	30 kHz
PWM resolution	10bit+Direction
Sampling rate	1 ms
Current meter range	< 3A
Current meter resolution	12bit

Fig. 3 Block diagram of current controller

提案するモータコントローラでは電流値 i_a を上位コントローラへフィードバックし、上位コントローラを用いて電流制御を行う構成とする。また、こうすることで上位コントローラにおいてモータの出力トルク τ_m を推定することも可能となる。モータコントローラの構成を図2、仕様を表1に示す。本モータコントローラでは電流計はHブリッジ回路の電源に取り付けられている。また、本コントローラへの指令値はHブリッジのデューティ比 D である。この結果、アナログ電圧指令の場合に必要なD/Aコンバータが不要となり、部品点数が削減されコントローラの小型化が実現した。また、サンプリングが 1 ms と比較的高速なため、アナログ微分回路を用いてポテンショメータから得られる位置情報の微分を行っている。こうすることで、速度検出値の誤差が低減できる。

本論文で提案するモータコントローラは、図3のブロック線図で示される電流制御コントローラを使用する。ここで、

i_d : 電流目標値

i_e : 電流誤差

K_{FF} : 電流ゲイン

K_{IP} : 電流誤差補償ゲイン

K_{EP} : 逆起電力補償ゲイン

である。式(7)は回転方向と指令方向が逆の場合に逆

起電力補償を行わないための補償要素であり、入力を x 、出力を y とすると、下記のように表される。

$$\begin{cases} y = x & (i_d \dot{\theta} \geq 0) \\ y = 0 & (i_d \dot{\theta} < 0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (7)$$

電流制御は中央プロセッサ上のソフトウェアにより実行される。

3. コントローラの構成

3.1 全体の構成 提案するモータコントローラはシリアルバスを介してホストコントローラと接続されている。この様子を図4に示す。モータコントローラはシリアルインタフェースを介してホストコントローラに接続されている。シリアルインタフェースの1つのチャンネルに対し最大4台までのモータコントローラを接続することが可能である。

3.2 ホストコントローラ ホストコントローラボードはIBM-PC互換機相当のPCとした。IBM-PC互換のプロセッサボードを用いることで、汎用のOSを使用することができる。本研究で用いるホストコントローラのOSにはART-Linuxを用いている。Linuxにおいて標準でサポートされるTCP/IPインタフェース、FTPサーバ及びTelnetサーバといった機能を用いることにより無線/有線を問わずネットワークを用

Fig. 4 Structure of controller

Fig. 5 Serial interface board

いてリモートコンピュータからのソフトウェア開発が可能となっている。

また、シリアルインタフェースとの接続方式を MiniPCI としたため、MiniPCI スロットを持つ汎用の小型マザーボードを用いることが可能である。

3.3 シリアルインタフェース ホストインタフェースは Xilinx 社製 FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いた MiniPCI 基板を製作した。外観を図 5 に示す。ホストコントローラとのインタフェースに用いられる MiniPCI 機能及びモータコントローラ通信のためのシリアルインタフェース機能は VHDL で記述され、FPGA 上で実行される。このため、機能の追加、変更が容易となっている。また、ホストインタフェースは 8 チャンネルのシリアルバスインタフェースを持ち、それぞれ並列に通信を行うことができる。

3.4 シリアルバス 本コントローラではシリアルバスを介して電流制御を行うため、シリアルバスには高速性、リアルタイム性が必要となる。このため、本研究では、周波数 2MHz パケットデータ長 21bit、全二重のプロトコルを新たに作成した。図 6 にシリアル通信のパケットの内容を示す。ホストコントローラとのデータ交換、パケットヘッダ、データ転送終了待ち時間を含め、1 パケット約 15 μ s 以下で通信が終了する。また、コマンドが入力された直後に AD 変換を開始するため、コマンドに対するフィードバック値のリアルタイム性も保証される。2 項で示したように、本論文で提案するモータ制御手法では、1 モータ、1 サンプルあたり PWM デューティ比の送信、角度、

角速度、電流値の受信を行う必要がある。PWM デューティ比指令の送信と角度値の受信は同時に行われるため、計 3 パケットの通信が必要となる。このため同一シリアルインタフェースで 6 台のモータを制御する場合、通信に 270 μ s の時間が必要である。

3.5 モータコントローラ モータコントローラは Altera 社製 CPLD (Complex Programmable Logic Device) を用いた小型基板を製作した。モータコントローラの外観を図 7 に示す。1 台のモータコントローラには FET を用いた H ブリッジ回路、電流検出回路およびアナログ微分回路がそれぞれ 3 チャンネル内蔵されており、1 台につき 3 台までのモータを制御可能である。CPLD 内には PWM コントローラとシリアル通信機能が VHDL を用いて記述されている。

4. 小型ヒューマノイドロボットの構成

提案するサーボコントローラを用いて小型ヒューマノイドロボットを構成した。外観および自由度配置は図 8 のようになっており、片足 6 自由度、片腕 4 自由度および腰部 2 自由度の全 22 自由度をもつ。また、表 2 の概要のように、全高 313 mm と小型で、かつ重量 2 kg と軽量であり、片手で持ち上げることが可能であり、非常に小型のヒューマノイドロボットを故実現する事ができた。このロボットを用いることで簡易に実験を行うことができる。

5. 実験

本章では試作したモータコントローラのトルク制

Fig. 6 Serial packet

Fig. 7 Motor controller board

Fig. 8 22 D.O.F. compact humanoid robot

Table 2 Specifications of humanoid

DOF	22
Height mm	313
Width mm	230
Depth mm	100
Weight kg (without PC and battery)	2.0

御性能評価と試作した小型ヒューマノイドロボットの動作確認を行った。特にヒューマノイドロボットにおいてはトルクセンシング機能とトルク制御機能を用いたコンプライアンス制御性能の評価を行っている。

5.1 トルク制御性能評価 提案するモータコントローラの効果を確認するため、図9のような実験装置を構成した。この実験装置では、モータの出力軸は長さ 200mm のアームを介してフォース/トルクセンサ (F/T センサ, 5/50, ビー・エル・オートテック製) に固定されている。この実験ではアームは固定されているため得られる特性は静特性となる。また、アームを水平に取り付け、垂直方向の力のみを計測した。

図10は電流制御結果を示すが、 i はモータコントローラの電流計により測定された電流値、 i_d は電流制御目標値、 i_e は i_d と i の誤差である。図10より、出力 $i_d = 1.4\text{A}$ に対し誤差 i_e は 50mA 程度であり、良好に電流制御が行われていることがわかる。図11に電流とトルクとの関係を示すが、電流の制御によって出力トルクを制御できていることが確認できる。ただし、電流減少時のトルク出力に減速機の影響と推定されるヒステリシスが見られる⁹⁾。しかしながらトルク増加方向に対しては直線的に変化しており、これらの結果から電流制御によりトルク制御可能なことが示されて

Fig. 9 Torque measurement equipment

Fig. 10 Result of current control

いる。また、2.1 項の DC モータモデルより K_e が求められれば制御可能であること、DC モータにおいては $K_\tau = K_e$ であることにより、静特性から K_τ が求められれば制御可能となるために動特性についての測定は行っていない。

5.2 ヒューマノイドによる起き上がり動作の実現

製作した小型ヒューマノイドロボットを用いて起き上がり動作を行った。

このとき動作に必要な目標値は予め計画した値を与えておき、PD 制御による位置制御により動作を行った。このときの様子を図12、代表的なモータからのトルク推定値を図13、得られた関節角度情報に基づいて OpenGL を用いてロボットの状態を再現した結果を図14に示す。ただし、図14においては地面に対しての姿勢が不明であるので、原点の姿勢は一定とした。図13(a)に腰部のトルクを示すが、この起き上がり動作において、 $t = 45\text{sec}$ 付近での腰部ヨ一軸に最も負荷がかかっていることが確認できる。これは図12から左腕を地面について上体を起こし始める瞬間に相当している。図13(c), (d)に示される脚部のトルクからは動作中、踵ピッチ軸にかかるトルクが最も大きくなっている。また、 $t = 11\text{sec}$ 以降の屈伸時にも膝にはほとんどトルクがかかっていない。このことより、この起き上がり動作中には、重心がほぼ膝の真上にきており、前のめりになっていることが読みとれる。このことは、トルク情報に処理を行うことで、状態の把握や、動作の安定を図ることができる可能性を示している。

さらに、図12の写真と図14の角度情報からの再現結果を比較すると、関節角度は良く符合しており、全関節のフィードバック情報をリアルタイムに取得できていることを示している。本項の実験によりヒューマノイドロボットの基本的な制御機能を確認できた。

Fig. 11 Torque and current

5.3 ヒューマノイドロボットによるコンプライアンス動作の実現 本研究で提案するヒューマノイドロボットは電流計測に基づいて関節に働くトルクが推定可能である。そこで、この情報をもとに、ロボットに柔軟性を持たせることを目的として関節角度に基づ

くコンプライアンス制御を行った。

コンプライアンス制御は次の運動方程式を基本としている⁽⁸⁾。

$$\Delta\tau = M\Delta\ddot{\theta} + D\Delta\dot{\theta} + K\Delta\theta \quad \cdots \cdots \cdots (8)$$

$$\Delta\tau = \tau - \tau_d \quad \cdots \cdots \cdots (9)$$

Fig. 12 Standing up motion

(a) Waist torque

(b) Shoulder torque

(c) Left leg torque

(d) Right leg torque

Fig. 13 Measured torque

Fig. 14 Motion playback by OpenGL

Fig. 15 Block diagram of position-based compliance controller

$$\Delta\theta = \theta - \theta_d \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 τ は関節に働くトルク、 τ_d は目標トルク、 θ は関節の角度、 θ_d は関節角度の目標値である。M、D、K はそれぞれ慣性係数、粘性係数、弾性係数である。ここで、式 (8) を $\Delta\theta$ について解き、サンプリング時間を T として離散化すると次式を得る⁽⁸⁾。

$$\Delta\theta(k) = G_1 \Delta\tau(k) + G_2 \Delta\theta(k-1) + G_3 \frac{\Delta\theta(k-1) - \Delta\theta(k-2)}{T} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 G_1 、 G_2 、 G_3 は次のように示される。

$$\left. \begin{aligned} G_n &= M/T + D + KT \\ G_1 &= T/G_n \\ G_2 &= (M/T + D)/G_n \\ G_3 &= M/G_n \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式 (11) で表されるコンプライアンス制御則を用いて図 15 の制御系を構成し、両膝の関節に適用した。ここで τ_{normal} は外力がかかっていない時の関節トル

クの値である。つぎに、両膝以外の関節は PD 制御による位置制御のみとし、あらかじめ安定に直立できる姿勢を定め、目標値として与えた。このとき、外力により膝角度が変化した場合の転倒防止のために両足の大腿部ピッチ軸および足首ピッチ軸の角度目標値をそれぞれの膝の角度を用いて次式のように修正した。

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_{fem} &= -0.75 \Delta\theta_{kne} \\ \Delta\theta_{ank} &= -0.5 \Delta\theta_{kne} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 $\Delta\theta_{fem}$ は大腿部ピッチ軸の角度変更量、 $\Delta\theta_{ank}$ は足首のピッチ角度変更量であり、添字は図 8 に示す関節名に一致している。この制御則により、膝を曲げた場合、それに対応して脚の付け根と足首の角度が変更され転倒が防止できる。

上記の制御系を用いる具体的なコンプライアンス実験として人間が外力を加えた場合に、外力に応じて膝関節によるコンプライアンス動作を実現できるかどうかを評価した。実験の様子を図 16、膝関節の出力ト

Fig. 16 Compliance control of knee joint

Fig. 17 Angle offset by compliance control

ルク τ_{kne} と関節角度変置量 $\Delta\theta_{kne}$ の関係を図 17 に示す. 図 17 より, 外力に応じて膝角度が変位し, コンプライアンス動作が行われていることが確認できる.

このとき関節トルク, 角度より, 人間の加えた外力は約 11.78N, コンプライアンスによる垂直方向の沈み込み量約 35 mm を実現していることが求められる.

6. まとめ

小型ヒューマノイドロボットに搭載可能でトルク制御可能なモータドライバを提案し, ついで製作を行い, トルク制御が可能であることを確認した. 続いて提案したモータドライバを用いて小型ヒューマノイドロボットを構成し, 立ち上がり動作を行わせた. この結果, ロボットの各関節の情報が正しくフィードバックされており, 通信速度も要求を満たしていることが確認できた. また, 関節トルクの制御が可能であり, 推定された関節トルクから力センサを用いずにコンプライアンスコントロールが可能であることを確認した.

今回製作したヒューマノイドロボットは小型であるため, 転倒するような外乱を加える実験も比較的簡単に実施できる. また, 各関節に働くトルクを検出可能であるため, 最も関節にトルクがかからない, 省エネルギーを実現できる歩容の検証や, 関節トルクから重力に対する姿勢を把握できる可能性がある.

今後, 今回製作した小型ヒューマノイドロボットに加速度等のセンサを追加するとともに, トルク制御特性を利用した動作を実現していく予定である.

文 献

- (1) 杉原知道・中村仁彦, 高機動性獲得に向けた運動制御実験のための小型ヒューマノイドロボットの開発, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会, (2003), 2A24.
- (2) 山崎文敬・松井龍哉・宮下敬宏・北野宏明, ヒューマノイド PINO—ヒューマノイドプラットフォームとしての外装と構造—, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会, (2000), 921-922.
- (3) 古田貴之・清水正晴・田原哲雄・奥村悠・戸田健吾・富山健・北野宏明, 小型ヒューマノイド Mk6 全身行動生成アルゴリズム検証用プラットフォームの構築, ロボティクス・メカトロニクス講演会'01, (2001), 2A1-N3.
- (4) 福島 E. 文彦・滝田健介・広瀬茂男・中村亨, 知能ロボット用シリアルバス型制御システムの研究, 第 7 回ロボティクスシンポジウム, (2002), 155-160.
- (5) 岡田慧・冬野明・木野泰之・小倉崇・稲葉雅幸・井上博允, 超小型プロセッサを用いたサーボユニットによる小型ヒューマノイドの実現, 機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 講演論文集, (2003), 1P1-3F-G2.
- (6) 浅野文彦・羅志偉・山北昌毅, 受動歩行を規範とした 2 足ロボットの歩容生成と制御, 日本ロボット学会誌, 22-1(2004), 130-139.
- (7) 谷江和雄・横井一仁・金子真, 減速機付き DC モータのトルク制御の研究, 機論, 54-503, C(1988), 1515-1519.
- (8) 本間淳平・藪田哲郎・梶信也・吉田耕一, マスタースレイブシステムのコンプライアンス制御-ダイレクトコンプライアンス制御とワールドコンプライアンス制御の比較-, 機論, 69-685, C(2003), 2366-2373.