

機関番号：12608

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21700131

研究課題名 (和文) FPGAによる力覚提示レンダリング専用コントローラの実現

研究課題名 (英文) Implementation of a dedicated Haptic Controller with FPGA

研究代表者

赤羽 克仁 (AKAHANE KATSUHITO)

東京工業大学・精密工学研究所・助教

研究者番号：70500007

研究成果の概要 (和文)：

ワイヤ駆動型力覚提示装置のための高効率・高機能コントローラについてシステム構成を中心に205kHzによるPWMモータ駆動回路の性能評価および電流制御PID制御システムについて研究を行った。特に、高精度の力覚提示を実現するためにFPGAを用いた専用コントローラの設計・開発を行い、従来よりもより柔軟で精度の高い力覚提示の可能性が開けた。特に、高速で、精度の高いモータ制御が実現したことで、今後の力覚提示装置への貢献が期待される。

研究成果の概要 (英文)：

I describe a high definition and high efficient haptic controller for wire driven haptic device. The control frequency of the haptic device is an important factor in the stability and fidelity. The conventional linear drive system is inefficient, difficult to miniaturize. The low frequency PWM motor drive system is difficult to rotate smoothly in high performance (low-inductance) DC motor. We aim for generate a high frequency of 205kHz (11bit) PWM control signal by using FPGA. Impedance control and admittance control are also implemented in FPGA as a PID control. The controller achieved high quality, high efficiency and compact system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，メディア情報学・データベース

キーワード：バーチャルリアリティ，ヒューマンインタフェース，ハプティックディスプレイ，ワイヤ駆動型力覚提示装置

## 1. 研究開始当初の背景

近年、計算機処理能力の向上やバーチャルリアリティ (VR) 技術の発展により、複雑な3次元VR空間を容易に構築できるようになってきた。特に、物理シミュレーションを伴っ

た VR 世界の構築が可能になり、物理法則に基づく VR 空間に力覚提示を加えたシステムが提案されている。我々の研究グループは、ワイヤ駆動型力覚提示装置 SPIDAR (図1) の開発をこれまで行ってきた。SPIDAR は、



図 1 SPIDAR

$$b > \frac{KT}{2} + B \quad (1)$$

位置計測と力提示に柔軟で高弾性の特性を持つ PE ワイヤを用いることで、装置自身のもつ慣性を小さくし、力提示部のグリップをワイヤでパラレルに制御するため、力提示におけるグリップの剛性を高くすることが可能であり、力提示型の力覚提示装置として優れた特性を持つといえる。

力覚提示装置は人間に対して力を提示するデバイスであるので、その安定性は重要な問題の一つである。特に実際の剛体のような硬い面を提示することはデバイスの発信や振動を伴い困難である。Colgate らは、硬い面を安定に提示する条件式として式 (1) を導いている。この条件式によれば提示面の剛性  $K$  を大きくしたければ更新周期  $T$  を短くしなければならない。

## 2. 研究の目的

本研究では、力覚提示のために 100kHz 以上の更新周波数を実現するため、FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いハードウェアレベルでコントローラの処理能力を向上させた小型専用コントローラを構築する。

FPGA を用いた専用の力覚コントローラを開発して、更新周波数の高速化を目指す。また、制御指令値を駆動するアクチュエータの応答性や、位置計測のためのセンサなどの性能変化も考慮し、駆動部分の設計を行う。さらに、出力がより高精細化されるので、さまざまな材質感の提示も可能となると考えられる。現在、材質感提示のために物体接触時の振動波形を積極的に利用した研究が報告されているが、その更新周波数は 1kHz 程度であり 100kHz の更新周波数を用いることにより出力波形の精度が向上し、質の高い力覚波形が生成可能になると考えられ、従来の力覚提示環境では実現不可能な高精細な力覚提示が可能になると考える。

## 3. 研究の方法

### 駆動方式

これまでの SPIDAR はインピーダンス型力覚提示装置であるため、そのモータドライバは電流制御を行うリニア駆動回路を用いて

きた。アナログ回路で容易に実現できるが、モータ駆動時のバイポーラトランジスタの発熱が大きく、その熱を放出するための大型のヒートシンクが必要であり、非効率で小型化が困難であった。また、回路の特性上、常に電流制御でのモータ駆動方式しか取れず、位置制御を行うことも制御の途中でリアルタイムに制御方式を切り替えることもできない回路構成であった。リニア駆動とは別の駆動方式に PWM (Pulse Width Modulation) 駆動がある。PWM による DC モータの駆動においては PWM の周波数が低いと電流が連続的に流れず、振動や発振を起し力覚の安定提示に問題があった。特に力覚提示装置 SPIDAR にはインダクタンスの低い高性能な DC コアレスモータ (Maxon RE-MAX 220429,  $L=0.309$ [mH],  $R=6.46$ [ohm]) を利用しているため、モータの電気時定数 (47.8[usec]) が短くその周波数値は約 20kHz に達する。また、ロータにコアを持たないためモータの慣性も非常に小さい。そのため、一般的に用いられている 20kHz 程度の PWM コントローラでは滑らかな駆動が困難な場合がある。このような DC モータの電流を連続に流し、なめらかな駆動を実現するためには PWM 周波数を高速にしなければならない。

また、人間の聴覚は 20kHz 程度の信号までとらえることができるが、人が固い物に触れるときその振動は骨を伝わり骨伝導として聴覚に刺激を与えることも考えられる。このような状況を力覚提示装置を用いて再現するには 20kHz の数十倍の搬送波で提示信号を出力しなければ精度の高い 20kHz の刺激信号を提示することは困難である。

特に力覚提示装置のような人に力感覚を提示する装置においては安定性と忠実性は重要であるので、高速な PWM 搬送波による安定なモータの駆動と忠実な提示信号は重要な要素となる。また、駆動部にかかわる部分を FPGA によりデジタル化できるので、電流制御のみならず位置制御や速度制御など様々な制御を構築することが可能となり、システム状況に応じてリアルタイムでアクティブに制御手法を変更することも可能となる。PWM に関する仕様を表 1 に示す。FPGA により 11bit (2048 階調) で約 205kHz の周波数を実現する PWM を実装した (FPGA 内部動作周波数 420MHz)。従来の 20kHz 程度の PWM を用いてインダクタンスの低い高性能 DC モータ

(Maxon RE-MAX 220429,  $L=0.309$ [mH],  $R=6.46$ [ohm]) を駆動する場合には電流リップル (474.7[mA]) が発生していたが、モータの電気時定数から換算し得られる周波数の約 10 倍の 205kHz の PWM でモータを駆動することにより電流リップルを 48.5[mA] まで減少させ、より滑らかに駆動することが可能になった。電氣的な応答性についても立ち上

がり時間が 110[usec]と非常に高速であり我々が提案している 10kHz の高解像度力覚レンダリングのシステムにおいても十分な応答性を持っていると考えられる。

表 1 出力仕様

	205kHz PWM
PWM 動作周波数	420 [MHz]
PWM 分解能	11bit (2048 階調)
指令電圧分解能	5.86 [mV]
指令電流分解能	0.907 [mA]
指令トルク分解能	19.32 [uNm]
電流リップル	48.8 [mA]
トルクリップル	1.033 [uNm]
立ち上がり時間	110 [usec]
チャンネル数	8 ch

@12[V], 50% duty

また、オン抵抗の低い高効率 MOSFET を駆動回路に利用することで駆動回路からの発熱を抑えることが可能であるので、ヒートシンクを小型化できる。力覚提示装置用の高性能 DC モータの駆動回路として駆動回路の高効率と小型化を実現した。205kHz の PWM の出力波形の精度をオシロスコープを用いて計測した。図 2 は duty 比 25% の時の計測結果である。

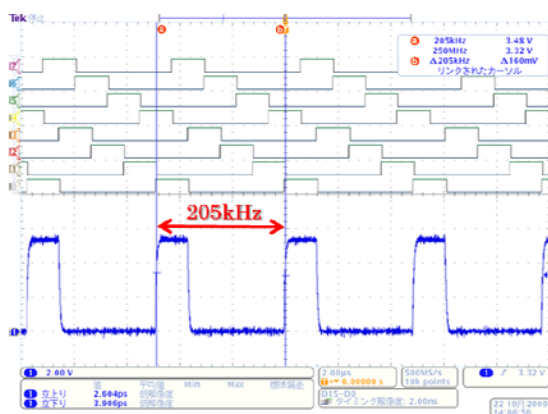


図 2 出力波形

図 2 の上 8 チャンネル分はデジタル計測値で下の 1 チャンネル分はチャンネル番号 0 のアナログ計測値である。各チャンネルの PWM の位相を意図的にシフトすることで、負荷を分散し、電源の最大負荷を減少させることで電源回路のサイズの小型化が可能となりより

効率的なシステムとなる。

次に A/D コンバータにより計測したモータに流れる電流値から計算できる提示力と実際に出力される提示力との間の補正を行うため、PWM の Duty 比と提示力の関係を計測した (図 3)。

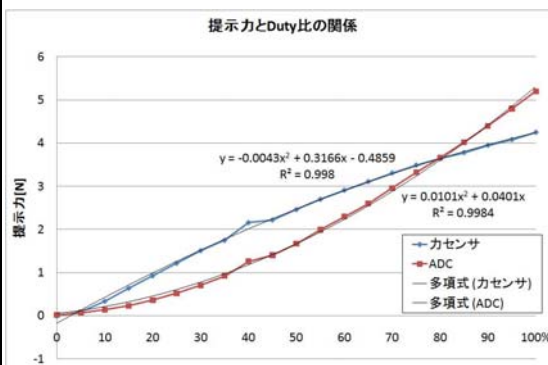


図 3 提示力と Duty 比の関係

この結果から二次の多項式近似を行った曲線を用いて指令提示力における実際の提示力の補正を行うことで、十分に精度の高い電流制御が可能となる。また、電流のフィードバックには A/D コンバータの計測やフィルタを用いるため、遅延が生じる。そのため電流追従に遅れが生じることが考えられる。この問題を解決するために図 3 の結果で得られた曲線を用いて指令提示力における PWM の duty 比を計算しその値を電流制御 PID コントローラの Feedforward 指令値とした構成にすることで、電流追従特性の改善を図っている。

### 制御手法

インピーダンス型力覚提示とアドミッタンス型力覚提示を実現するシステム構成を図 4 に示す。双方の制御はリアルタイムに切り替えることも可能である。

### インピーダンス制御 (力制御)

DC モータの発生トルクは流れる電流に比例するので、力制御を行うために DC モータに流れる電流を A/D コンバータで計測する。指令値と計測値が一致するように PID でフィードバック制御を行う。従来のリニア駆動のアナログ回路方式では比例成分だけの追従であったが、比例・積分・微分成分をリアルタイムに変更・設定可能であるので、追従性能の向上が見込まれる。また、エンドエフェクタの位置計測はロータリエンコーダにより行う。

### アドミッタンス制御 (位置制御・速度制御)

位置制御を行うため、ワイヤ単位で目標位置指令値とロータリエンコーダの計測値と

が一致するようにPIDでフィードバック制御を行う。これまでSPIDARでアドミッタンス制御を行う場合は、エンドエフェクタの位置に対して位置制御を行う方式をとっていた。しかし、1kHz程度の更新周波数では、剛性を高く設定すると発信や振動が生じてしまうため、性能の高い位置制御が困難であった。ワイヤ単位での位置制御を205kHzという高速な追従制御で行うことは、安定した位置制御を行うことができると考えられる。また、提示力の測定にはDCモータに流れる電流をA/Dコンバータで計測した値から求める。これにより別途力センサなどをつけることなく力の計測を行うことが可能である。また、計測値をロータリエンコーダの速度値もしくはタコジェネレータなどによる速度値とすることで速度制御によるアドミッタンス型の力覚提示装置の構築も可能である。

#### システム構成

近年では高速なMOSFETによるスイッチングが可能となり、FPGAにより制御ロジックを容易に変更でき、高速な信号処理が行える環境が整っている。

システム構成を図4に示す。

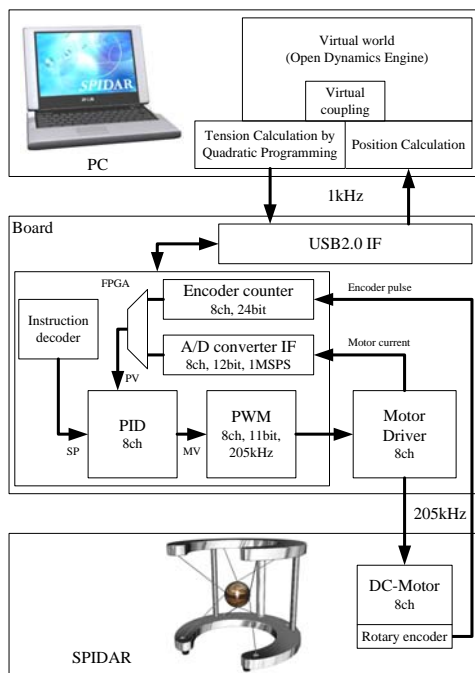


図4 システム構成

#### 4. 研究成果

インピーダンス型提示手法における制御

電流の計測実験を行った。更新周波数 1kHzのVR世界のオブジェクトに接触したことを想定し、接触時の指令電流値と測定電流値を比較した。計測にはAltera QuartusIIのSignalTapIIオンチップデバッカを用いて行い、サンプリング周波数はPWMの制御周波数である205kHzで行った。結果を図5に示す。図は上から電流指令値と電流計測値、次の図は電流指令値と電流計測値の差、次の図はFeedforward指令値とFeedback指令値およびPIDの出力値であり、最後の図はモータのロータリエンコーダ値を表している。横軸はすべて時間である。

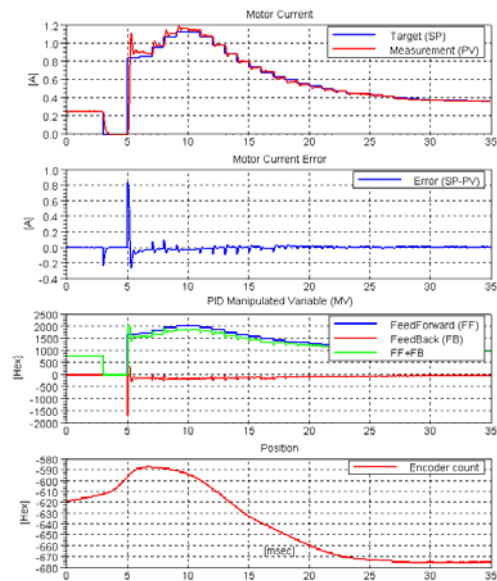


図5 計測結果

結果より指令電流に対し計測電流値が追従しているのが分かる。PCからの指令値は1kHzで更新されるためその影響で電流指令値が階段状になっており、その影響が指令値と計測値の誤差に表れているのが分かる。提示面の剛性によってこの誤差が力覚提示に影響を及ぼすことも考えられるので、より滑らかに駆動するために電流指令値の更新周波数を高速にすることが考えられる。我々が提案している高解像度力覚レンダリングを本システムにも適用することで指令電流値の更新周波数を10kHz以上にすることが可能になるので、より滑らかで応答性の高いシステムが構築できると考える。FPGAの機能を拡張しSH4などのプロセッサをシステムに導入しより高精度な力覚提示システムの設計が必要であると考えられる。ワイヤ駆動型力覚提示装置のための高効率・高機能コントローラについてシステム構成を中心に205kHzによるPWMモータ駆動回路の性能評価および電流制御PID制御システムについて研究を行った。特に、高精度の力覚提示を実現するために

FPGA を用いた専用コントローラ的设计・開発を行い、従来よりもより柔軟で精度の高い力覚提示の可能性が開けた。特に、高速で、精度の高いモータ制御が実現したことで、今後の力覚提示装置への貢献が期待される。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 8 件)

① 浅田 惇一, 赤羽克仁, 佐藤 誠,  
バイオフィードバックによる高忠実力覚提示装置の開発, 日本バーチャルリアリティ学会, 2011/3/9, 慶應義塾大学

② Katsuhito Akahane, Chenxi Yu, Xiangning Liu and Makoto Sato,  
The Research of Light-Weighted Finger Haptic Device using Voice Coil, ICAT2010, 2010/12/2, University of South Australia

③ 赤羽 克仁, 兪 晨曦, 佐藤 誠,  
ボイスコイルを用いた軽量の触覚提示装置に関する提案, 日本バーチャルリアリティ学会, 2010/11/2, 東北大学

④ 赤羽 克仁, 兪 晨曦, 五十嵐 達郎, 小西 康貴, 佐藤 誠,  
ワイヤ駆動型力覚提示装置のための高性能コントローラの開発, 日本バーチャルリアリティ学会, 2010/9/17, 金沢工業大学

⑤ 高見 豪, 梅田 裕介, 小西 康貴, 一色 正晴, 赤羽 克仁, 佐藤 誠,  
多指型ハプティックインタフェース SPIDAR-MF の開発, 日本バーチャルリアリティ学会, 2010 3.5, 電気通信大学

⑥ 尚 磊, 赤羽 克仁, 一色 正晴, 佐藤 誠,  
ボイスコイルモータを用いた二次元力覚提示装置の提案, 日本バーチャルリアリティ学会, 2010 3.5, 電気通信大学

⑦ Katsuhito AKAHANE,  
A Development of a High Definition and Efficient Haptic Controller for Wire Driven Haptic Display, 日仏超臨場 VR ワークショップ, 2009 12.3, Bordeaux, France

⑧ 赤羽 克仁, 一色 正晴, 劉 湘寧, 佐藤 誠,  
ワイヤ駆動型力覚提示装置のための高機能コントローラについて, 日本バーチャルリアリティ学会, 2009 10.28, 大阪大学吹田キ

ャンパス

[その他]

ホームページ等

<http://sklab-www.pi.titech.ac.jp/blog/>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

赤羽 克仁 (AKAHANE KATSUHITO)

東京工業大学・精密工学研究所・助教

研究者番号: 70500007