

異なる減速機構を用いたハプティックデバイスの力感覚提示の評価

和田 一記, 谷野 徹也, 友國 伸保, 黄 健

Evaluation of force display using haptic devices with different reduction mechanism

Kazuki WADA, Tetsuya TANINO Nobuyasu TOMOKUNI and Jian HUANG

Abstract

In this paper, we developed two haptic devices using different gear mechanisms for force displaying in order to investigate influence of the different gear driving mechanisms. Force-based servo loop and position-based servo loop were designed for impedance control and experiments were made to objectively evaluate the impedance control effect. Furthermore, subjective experiments of weight lifting were made for young subjects and analyses of weight cognition were made by the method of constant stimuli.

Key Words: Robot, Reduction Mechanism, Force Control, Impedance Control

1. はじめに

近年, 人間の触覚をコンピュータのデバイスとして使用するハプティック技術が研究されてきた. ハプティック技術に用いられる力情報の提示装置はハプティックインターフェイスと呼ばれ, バーチャルリアリティのユーザインターフェイスとして主に工学技術分野で使用されるほか, 人間の感覚を調べる心理学, 認知学においても被験者に力感覚を提示する研究装置として活用されることが期待されている⁽¹⁾⁽²⁾.

一方, これらハプティックインターフェイスは人間の触覚にかかわるデバイスのため, 高い提示性能を求められる. 一方, デバイスの提示性能には個体差が存在しており, 主な要因のひとつとしては, これまでに開発された多様なデバイスの減速機構に違いが出来てしまったことが上げられる. ハプティックインターフェイスを用いて大きな力を提示するためには, 減速機構を利用することが多く, その種類も多岐にわたる. その減速機構が異なればハプティックインターフェイスの力・位置提示能力, さらに, 知覚実験等における被験者の力感覚にも影響を与えられ⁽³⁾.

本稿では, この問題に着目し, 減速機構の違いによる力感覚の影響を検討していく. 具体的には, 異なる減速機構を持つアームデバイスを試作し, それぞれの目標力の再現度を様々な条件の元で定量的に評価することで, 減速機構の違いによる力提示特性の影響を調べる.

2. 実験装置の試作

減速機構の違いによる力感覚提示能力の特性を明らかにするため, 減速機構の異なる 2 つのデバイスを試作し比較実験を行う. 試作したデバイスの概要を図 1 に示す.

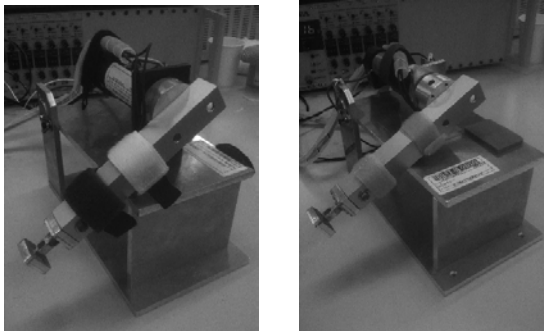
本稿で用いたデバイスは, 減速機による特性の違いを出しやすくするために一軸のアームデバイスを用いており, 機構干渉等の影響を少なくする構成となっている. アクチュエータ部分には 2 台の DC モータ (A-max 26, マクソンジャパン (株)) を使用する. また, それぞれのモータにプラネタリ減速機構 (GP32C, マクソンジャパン (株)) とハーモニックドライブ減速機構 (RH-8D-6006-E100AL, ハーモニック・ドライブ・システムズ (株)) を取り付け, それぞれの機構を図 1(a)と図 1(b)に示す.

本稿では簡単な知覚実験も行うため, 実験の際に被験者がデバイスを動かすための”つまみ”も用意している. 作成したアーム先端の形状を図 1(c)に示す. この”つまみ”は被験者の指と接触する部分が回転するように出来ており, 被験者がアームデバイスを動かした時に指とデバイスとの摩擦で人間の感じる重さ感覚に変化が起こり, 実験結果が正確に得られないことを防止する.

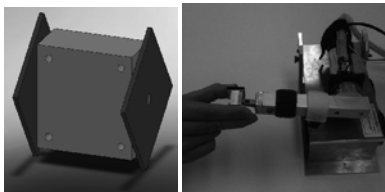
2.1 遊星歯車機構(PD) 図 1(a)に示す遊星歯車減速機構とは遊星ギアにより減速を行う機構である, 一般的な機構で扱いやすく, 入手も簡単であるが, 減速を

*近畿大学工学部知能機械工学科

Dept. of Intelligent Mechanical Engineering
Faculty of Engineering, Kinki University



(a) Planetary gear arm (b) Harmonic gear arm



(c) End effector fixed on the arm

Fig.1 The developed 1-DOF arm robot

行うために多数のギアを用いるためバックラッシュの影響を受けやすいという欠点がある。

2.2 ハーモニックドライブ減速機構(HD) 図 1(b)に示すハーモニックドライブ減速機構はハーモニックギアより減速を行う機構である。この機構を用いて減速を行う際は多数のギアが同時に噛み合うためバックラッシュの影響を非常に少なくすることが出来るが、その反面非常に高い粘性特性を持つこととなる。

各デバイスのアーム先端部分にはアームに加えられた力を測定するための 3 軸の F/T センサを取り付け、モータにはモータ角度を測定するためのエンコーダが取り付けられるこれらによりアーム先端に掛かる力とアームの回転角度から求めたアーム先端の位置情報を検知し、得られたこれらの情報をもとにしてコンピュータによるデバイスの制御を実現する。

3. 制御手法

ハプティックデバイスで力感覚を呈示するため、インピーダンス制御手法が広く用いられてきた。本稿では、より確実に操作者に提示する力の差を見るため位置サーボ系、力サーボ系の 2 通りのインピーダンス制御を用いた。これら 2 通りの制御ブロック線図を図 2、図 3 に示す。各図に示す M, D, K はインピーダンスパラメータである。

図 2 の位置サーボ系にセンサで検出した力 f と目標力 f_d との差 Δf をインピーダンスダイナミクスの式に入力し、そこから得られた変位 Δx を入力側にフィードバックするので、パッシブな性質を持つ制御系である。一方、図 3 の力サーボ系では、アームの先端位置 x と目標位置 x_d との差 Δx をインピーダンスダイ

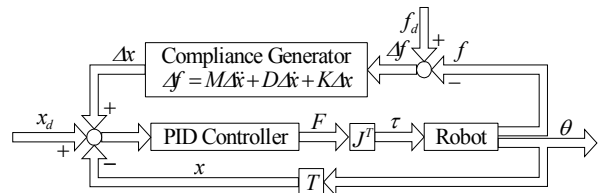


Fig.2 Block diagram of position servo loop

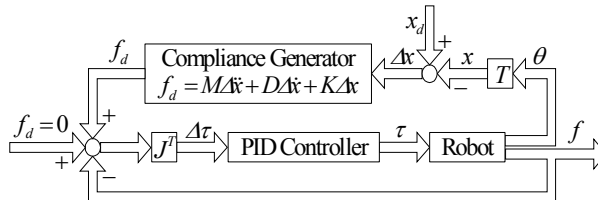


Fig.3 Block diagram of force servo

ナミクスの式に入力し、そこから得られた反力 Δf をフィードバックするので、こちらは外力に対してアクティブな制御系である。

4. 力提示の客観評価

力提示能力を定量的に評価するため、試作したデバイスそれぞれで位置サーボ系制御での弾性評価、力サーボ系制御での弾性評価、粘性評価、さらにそれらを複合したインピーダンスパラメータの再現率の検討を行った。評価の方法は、位置サーボ系ではアーム先端の目標位置に対する測定位置、力サーボ系ではアーム先端の F/T センサに掛かるべき目標力と測定力をそれぞれ比較し、目標値に対してどの程度近い測定値が得られたかを評価する。ただし、制御方法ごとに最適な PID ゲインが変わるため、あらかじめ予備実験から適切な PID ゲインを決めてある。

4.1 位置サーボ系による剛性評価実験 試作したロボットを用いて剛性制御を行い、再現率の評価を行った。具体的には、アームに仮想的な力を与えることによりアーム先端の位置を変化させ、目標として生成される軌道と実際にエンコーダから得られた情報から測定した軌道との比較を行った。位置サーボでの PD 機構と HD 機構のそれぞれの結果を図 4(a)と図 5(a)に示す。これらの図に示すように、PD・HD いずれの減速機構でも非常に高い再現性を得ることが出来た。

4.2 力サーボ系による剛性評価実験 力サーボ系制御による剛性評価ではロボットに仮想的な位置情報を与え、測定で得られた反力と理想反力との比較を行った。力サーボでの PD 機構と HD 機構のそれぞれの結果を図 4(b)と図 5(b)に示す。図 5(b)から HD 機構では剛性制御の高い再現性が得られたことに対して、図 4(b)の PD 機構では、運動方向の切り替えの起こるタイミングで目標値との大きな差が見られる。これは、PD 機構ではバックラッシュが発生するのに対して、

HD 機構では原理的にバックラッシュが存在しないことから考えられる。

4.3 カサーボ系による粘性評価実験 同様に粘性評価においては、アーム先端に対して仮想速度を与えることによって得られた反力と目標力との比較を行った。カサーボでの PD 機構と HD 機構のそれぞれの結果を図 4(c)と図 5(c)に示す。粘性評価においても剛性評価実験のときと同様に、図 5(c)の HD 機構では高い再現性が確認されたのに対し、図 4(c)の PD 機構では運動方向の切り替えの起こるタイミングで目標値との大きな差が見られる。

4.4 カサーボ系によるインピーダンス制御 総合的な力提示能力の測定を行うためバネマスダンパー制御による再現率の検討を行った。カサーボでの PD 機構と HD 機構のそれぞれの結果を図 4(d)と図 5(d)に示す。結果は図 4(d)と図 5(d)に示すように、PD では目標値との大きな差がみられたことに対して、HD では高い再現性を確認できた。

4.5 総評 位置サーボ系を用いた制御においては、PD, HD の両減速機構高い再現率を確認することが出来たが、カサーボ系を用いた制御では PD において目標値に対する測定値に差がある箇所がみられた。これは減速機のもつバックラッシュの影響によるものと思われる。一方 HD ではどの制御手法においても一貫した高い目標値追従性能を確認出来た。

5. 主観的評価

本稿では、試作したデバイスを用いて減速機構の違いが人間の主観評価に与える影響についての検討を行うため、インピーダンス制御により仮想重量をアームデバイスで再現し、被験者はこの仮想重量を持ち上げることによって重さの知覚実験を行った。

5.1 実験方法 本稿で用いた実験方法は、被験者はアーム先端を指でつまみ、先端を水平状態から上に持ち上げる運動を行ってもらい、持ち上げたときの感覚で重さの判断を行う。1 試行で 2 回の持ち上げを行い、1 回目の持ち上げに標準物体を、2 回目に比較物体の持ち上げを行う。その後、被験者は、標準物体の重さに対して比較物体の重さを評価する。

評価方法については、本稿において心理学分野で用いた恒常法を利用する。したがって、1 回目の標準刺激により 2 回目の重さ感覚が重い場合”yes”，軽い場合”no”というような評価方法で重さを評価してもらう。

また、標準刺激の重さを 300g とし、基準重さ刺激に対して 3%刻みで±30%変化するように計 22 パターンの比較重さ刺激を用意した。22 パターン重さの提示順番を乱数発生によって決めており、さらに、慣れ

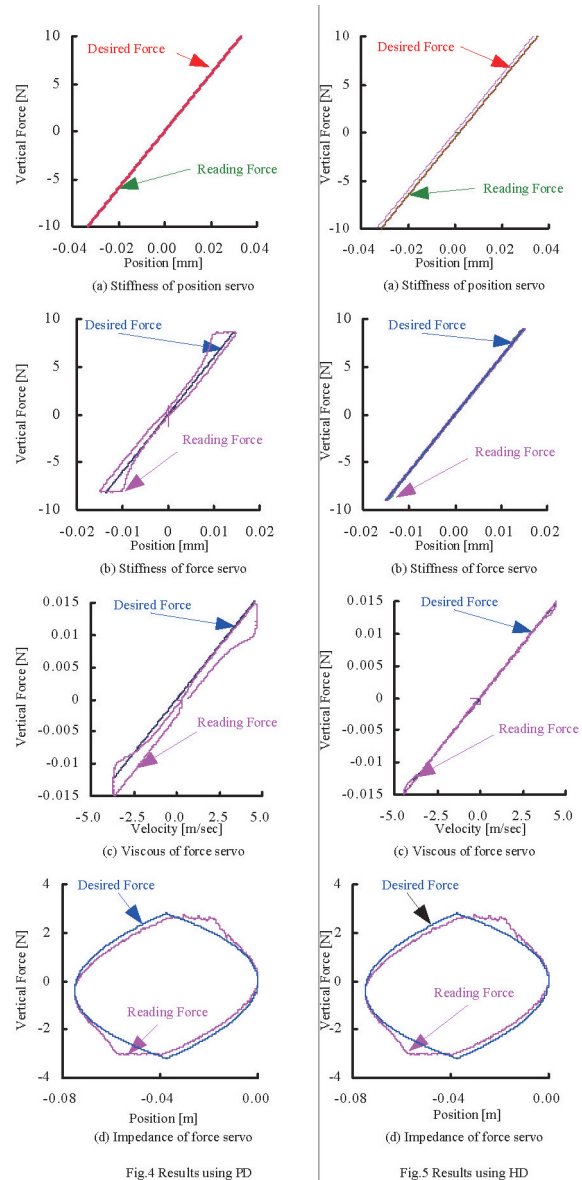


Fig.4 Results using PD

Fig.5 Results using HD

や外乱による影響を少なくするため、22 パターンを 4 回行う、すなわち、一人で計 88 回試行の重さ持ち上げ実験を行った。

5.2 実験結果と考察 重さの評価結果からそれぞれの比較重さを算出した。標準物体に比べて比較物体が軽いときと重いとき、PD と HD のそれぞれを用いて得られた結果を図 6 と図 7 に示す。これらの図においては、横軸は比較重さで、縦軸は正解率である。図 6 と図 7 から分かるように、比較物体が軽い場合に PD と HD を用いて得られたそれぞれの正解率の平均値は 78.65%, 85.73%であった。一方、比較物体が重い場合に PD と HD のそれぞれの正解率の平均値は 85.46%, 85.23%であり、HD において比較物体が軽い場合の正解率の平均値に比べて高い結果が得られた。

また、弁別閾を求めるため、得られた PD と HD

の結果の S 字曲線を図 8 に示す。心理学では、測定関数にあたる正解率 50 パーセントの点は主観的等価点 (point of subjective equality: PSE) と呼ばれ、理論的には多数回の試行を行ったとき標準刺激 (standard stimulus: St) と等しい。しかし、多くの場合この PSE は標準刺激の物理量とは完全には一致せず、標準刺激と PSE の差が恒常誤差 (constant error: CE) と呼ばれる心理物理学的量となり⁽⁴⁾、式

$$CE = PSE - St \quad (1)$$

によって算出される。本稿では、得られた重さ評価の正解率から主観的等価点 PSE と恒常誤差 CE を求め、これが減速機構の違いによってどのように影響するかを検討する。

図 8 から

PD 機構 : PSE=276.16 g CE=-23.84 g

HD 機構 : PSE=280.78 g CE=-19.22 g

が得られる。この結果から、HD を用いたデバイスのほうが心理物理学的にも若干ではあるが目標値に近い知覚を被験者がしていることがわかったが、両機構で恒常誤差 CE において近い結果が得られた。

今回、客観評価の結果において両機構のインピーダ

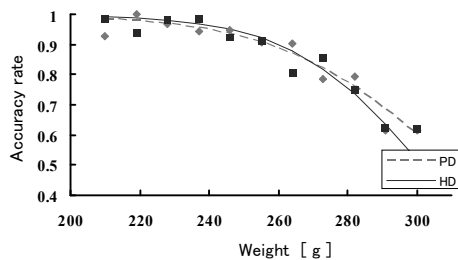


Fig. 6 Accuracy rate of evaluation results (standard weight > compared weight)

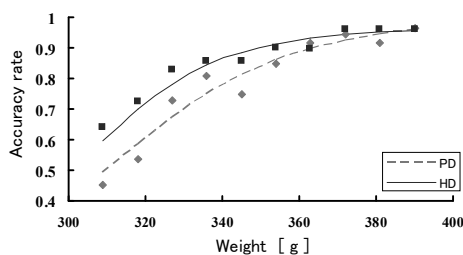


Fig. 7 Accuracy rate of evaluation results (standard weight < compared weight)

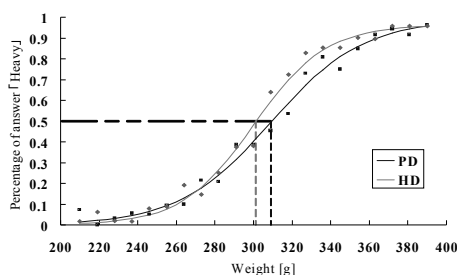


Fig. 8 Results of evaluation

ンス提示特性に大きな差が見られたことに対して、主観評価の実験結果大きな差が見られなかった。その理由として考えられるのが、今回行った刺激実験の方法が持ち上げ時の評価であったため、客観評価で PD に見られたようなバックラッシュの起こる動きの切り替えし動作がなく、持ち上げのみのバックラッシュが影響しない状態であった。したがって、PD・HD とともに力提示能力はほぼ同じであることがわかるのではないかとと思われる。

6. まとめ

本研究では、減速機構が力提示能力に与える影響について検討するため、異なる減速機構を有する 2 つのアームロボットを試作した。また、位置サーボ系制御、力サーボ系制御を提案し、様々な力提示能力の比較実験を行った。位置サーボ系制御においては PD、HD の両減速機構高い再現率を得ることが出来たが、力サーボ系制御において、PD 機構の場合目標値との大きな差が見られたことに対して、HD 機構の場合高い再現性を得た。

また、減速機構の違いが主観評価に与える影響についても検討するため、重さの持ち上げ実験を行った。重さ評価結果の正解率から PD よりも HD の方が恒常誤差の少ない結果が得られた。ただし、この結果はバックラッシュを含まない持ち上げ動作という限定的な状況下での結果であるため、今後様々な条件下での比較実験も行っていく必要があると思われる。

文献

- [1] Hara, M., Higuchi, T., Yamagishi, T., Ashitaka, N., Huang, J. and Yabuta, T., Analysis of Human Weight Perception for Sudden Weight Changes during Lifting Task Using a Force Display Device Proc. of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2007), pp.1808-1813, 2007.
- [2] 反保紀昭・竹村洋・原正之・黄健・藪田哲郎, ハプティックインタフェースのアクチュエータ機構が人間の力感覚に及ぼす影響の評価, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会講演論文, 3L2-06, 2008.
- [3] 反保紀昭・原正之・黄健・藪田哲郎, 異なる減速機構を用いたハプティックデバイスにおける力感覚の評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会'09, 1A1-B06, 2009.
- [4] G.A.ゲシャイダー著 倉片憲治・金子利佳・芝崎朱美訳 (2002) 『心理物理学-方法・理論・応用 (上巻) -』北大路書房 pp.43