

非線形性を考慮した伸縮型仮想道具との 身体的インタラクションに関する研究

佐藤 大樹^{*1} 渡辺 貴文^{*1} 上杉 繁^{*2} 三輪 敬之^{*2}

Bodily Interaction with Rhythmically Extending Virtual Tool Focused on Nonlinearity

Hiroki Sato^{*1}, Takabumi Watanabe^{*1}, Shigeru Wesugi^{*2}, Yoshiyuki Miwa^{*2}

Abstract - It's noted that using a physical tool creates a sense of a non-separable relationship between user's body and the tool. Authors have studied a design of a virtual tool creating such a sense in using the virtual tool. Therefore to investigate dynamics of bodily interaction between user's hand and a virtual tool, authors developed a virtual tool experiment system, in which the virtual tool could extend toward longer direction based on several dynamic models, such as linear damped oscillator model, auto-excitation oscillator model and nonlinear damped oscillator model, corresponding to user's swing. Experiments on using the virtual tool including those models demonstrated features of interactions between user's swing and the extending virtual tool.

Keywords: virtual tool, bodily Interaction, nonlinearity, tool-use, embodiment

1. はじめに

日常生活においてペンやはさみなど道具を使用しているとき、ペン先と紙との接触において直接手で触れているかのように感じるという、道具の先端にまで身体が拡張しているかのような主観的な経験をすることがある。こうした現象に関連した知見が、昨今、脳科学や認知科学の分野から報告されている^[1]。

著者らは、このような道具と身体の主観的な非分離性に着目し、バーチャル空間やビデオ映像空間に表現した道具においても、こうした感覚の創出が可能であるかという問題に関して、バーチャルな道具の視覚的表現手法や非分離性を評価する手法に着目した研究^{[2][3]}を行ってきた。

そして、手の振りに応じて把持した棒の長手方向の長さが視覚的に伸長する仮想道具を先に開発し、身体動作に応じて道具の形状が変化する現象において、身体と道具との非分離性の関係にアプローチできるのではないかという問題を見出した^[4]。

そこで本研究はこうした問題意識にもとづき、道具使用者の周期的な手の振りに応じて、把持した道具の長手方向の長さが、様々な力学モデルに従って動的に変化する仮想道具システムを開発し、手の振りと仮想道具の形状変化との関係性について検討したので、以下に報告する。

2. 研究手法

一般的な道具の使用場面を想定すると、その道具を使

用して対象物を掴んだり、移動したりするなど、身体と道具と対象物との3者の関係について検討する必要がある。本研究では、3者間のインタラクション以前に、身体と道具のみの2者間の関係に注目するため、カメレオン棒型の道具に着目した。カメレオン棒とは細長い紙をプラスチック製の棒に幾重にも巻きつけた玩具であり、振りの動作に対して巻いた紙が棒の長手方向に周期的に伸長する。使用者はカメレオン棒を使って対象物を操作することも可能ではあるが、むしろカメレオン棒の使用そのものを楽しむように、道具と身体との2者関係として扱うことが可能な系である。

本研究ではカメレオン棒型の道具を把持して前方に振り出す運動を反復する際に、棒の長さの伸縮リズムと使用者の手首の回転運動（以下、スイングとする）がどのように相互作用し、互いのリズムが生成されるか調べる。そこで、まずは、振りに対する道具の力学的な特性に着目し、これらを変化させて比較することにした。

上記を実現するためには、棒を伸縮させるための振動数などのパラメータ設定が容易であることや、実物体の道具では実現困難な様々な道具の伸縮表現や力覚提示を可能にすることが必要となる。また、実際の道具のように直接把持して操作可能であることも重要である。本研究では以上を実現するため、実体のグリップに、視覚的に表現した仮想棒を接続する“仮想道具”を利用する方法を提案する。

3. 実験システムの開発

3.1 システムの設計

仮想道具実験システムの設計要件を以下にまとめる。

- ・把持する実体のグリップに仮想棒を整合的に接続
- ・3次元的な仮想棒の視覚表現

*1: 早稲田大学大学院 理工学研究科

*2: 早稲田大学 理工学術院

*1: Graduate School of Science and Engineering, Waseda University

*2: Faculty of Science and Engineering, Waseda University

- ・スイングに応じて仮想棒が伸縮する視覚表現
- ・仮想棒の長さ、動きに応じた力覚提示
- ・数種類の力学モデルの実装
- ・以上をリアルタイムで実行できること

実空間に3次元的な仮想棒の視覚表現を重畳表現する方法としてビデオシースルー方式と光学シースルー方式が挙げられる。本システムでは自身の身体を直接視認できることを重視し、光学シースルー方式を採用する。また、頭部への強い拘束感など身体的な負担を与えるHMDは使用しないことにした。そこで、ハーフミラーを頭部から離れた場所に設置し、これを介することで実空間と3次元的な仮想映像の重畳表現を可能にする映像提示システムを新たに開発することにした。

また、把持するグリップは位置センシングが可能であること、高い時間的、空間的分解能を有する力覚提示が可能であること、さらには視覚と力覚を自由に操作することの三点を実現するために三次元入出力デバイス (PHANTOM OMNI, SensAble 社) のスタイラス (φ20×180[mm]) を用いることにした。

以上の仮想道具を視触覚表現するシステムに対し、道具が伸縮する力学モデルを実装する。

3.2 システムの実装

上記に基づき、図1に示すような仮想道具システムを開発、実装した。本システムは、水平スクリーン (アクリル盤, 840×1000×3[mm])、使用者の頭部後方に設置する映像投影スクリーン (950×850[mm])、これに映像を投影するためのプロジェクタ、投影された映像を使用者に提示するためのハーフミラー (200×150[mm])、そして映像を生成するためのPCから構成される。高さ90[cm]に水平スクリーンを配置し、そのスクリーン上に三次元入出力デバイスを配置する。

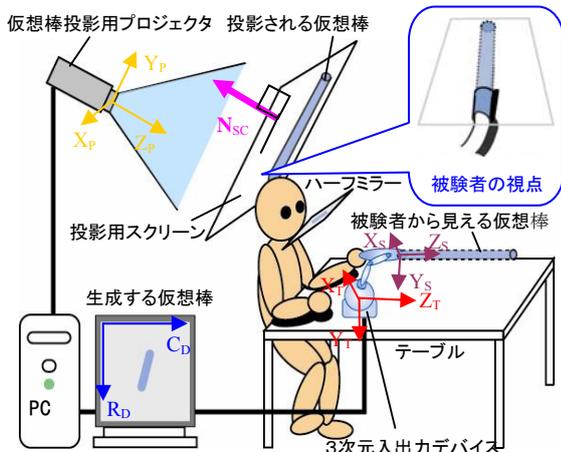


Fig.1 Rhythmically Extending Virtual Tool System

図1. 仮想道具実験システム

仮想棒の映像提示手法は、スタイラスから位置姿勢計測を行い、この値を元にグリップに仮想棒を視覚的に接合したように提示する。生成した仮想棒はプロジェクタから被験者の頭部後方に設置したスクリーンに投影し、

この映像をハーフミラーに映す。この際に投影した仮想棒がハーフミラー越しに三次元的に見えるよう、被験者の視点位置とハーフミラーの位置姿勢、被験者の頭部後方に設置したスクリーンの位置姿勢に基づく射影変換をPCにて行う。以上により、把持して動かすグリップと三次元的な仮想棒の映像を誤差3[cm]以内の精度で接合提示することを実現した (図2)。



(a) 実験システムの様子 (b) 被験者の視点
Fig.2 In-use the experimental system

図2. 本システムを使用している様子

仮想道具から与えられる力覚の生成は、仮想道具の時々刻々変化する長さ情報から手首を回転軸とする棒の慣性モーメントを、手首の角加速度や仮想道具の速度変化からトルクを算出し、三次元入出力デバイスにより力覚として呈示することにより行う。なお、力覚の提示についてはOpen Haptics ライブラリを使用している。以上によりスイングに応じて伸縮する仮想棒の表現を約60[fps]の描画速度で実現した。

4. インタラクション実験

4.1 道具の力学モデル

実装した4つの仮想道具の力学モデルを以下に記す。

①長さ固定 (入力に対しての時間的変化無し)

②線形減衰振動子 (質点・ばね・ダッシュポット系)

$$m\ddot{x} - c\dot{x} + kx = F \quad m=1.0, c=2.0, k=4.5 \quad (1)$$

③自己励起振動子 (ファンデルポール方程式)

$$\ddot{x} - \mu(1-x^2)\dot{x} + \epsilon x = F \quad \mu=1.0, \epsilon=5.0 \quad (2)$$

④非線形減衰振動子 (ダフニング方程式)

$$\ddot{x} + k\dot{x} + \mu x + \epsilon x^3 = F \quad k=0.05, \mu=0, \epsilon=0.05 \quad (3)$$

①は身体行為によって仮想棒の長さがまったく変化しない静的なモデルであり、コントロール条件として設定した。②は線形系として代表的なものであり、一般に、外力に比例した振幅で振動する。カメレオン棒の近似的なモデルとして選んだ。外力がない場合、エネルギーはダッシュポットにより散逸し、振幅が0に収束する。③④は共に非線形系であり、③は外力の大きさとは無関係に一定の振幅で振動するというリミットサイクル振動子としての性質を持つ。またこの振動子は引き込みが起きることが知られている。④はストレングアトラクタの挙動をしめす代表的なモデルである。すなわち解の軌道が一定とならない時間平均的に不安定な系であり、このような非定常な系と身体とのインタラクションを調べるこ

とができる。

上記の各力学モデルを仮想道具に実装する方法について述べる。本研究では仮想棒の先端に質点があるものとした(図3)。そして、肘や手首の位置姿勢変位に応じた質点に関する運動方程式を立てる。このように立てた運動方程式の演算方法として、オイラー法による数値積分を用いた。以上により任意の運動方程式に基づいて伸縮する仮想棒を表現する。

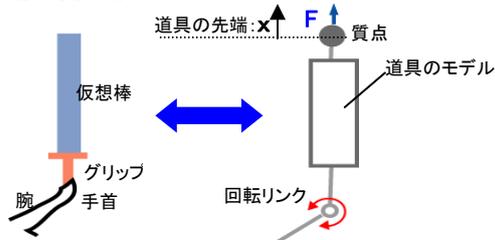


Fig.3 Modeling of dynamical properties

図3. 力学特性を実装するためのモデル化

4.2 実験方法

仮想棒の伸縮周期と使用者のスイングのリズムの関係を調べるための実験を以下の通り行った。被験者（健康な成人男性6名（右利き5名，左利き1名），22 - 25歳）には、カメレオン棒で遊ぶのと同様に、各自が心地よいと感じるリズムで仮想道具を1条件につき180[sec]、右手で前方に投げ出すように振り続けるよう指示した。また、水平スクリーン上に肘置きを設置し、肘を置く場所を指定した。そして把持するグリップの位置姿勢のデータからスイング（手首の角度）と、被験者に提示されている仮想棒の伸縮（長さ）とを同時にサンプリング間隔15[msec]で計測した。なお被験者には実験終了後に各条件における仮想道具とのインタラクションに対する印象をコメントとして答えてもらった。

4.3 実験結果

時間変化する周波数と位相の変化について調べるためにスイングや道具の伸縮のデータに対し、短時間フーリエ変換（STFT）（ハニング窓，長さ1024 sample）による解析を行った。二例の結果を図4に示す。なお、周波数のピークをグラフ上に白線で記した。

この結果から、①の長さ固定②線形振動子と③自己励起振動子の場合は時間変化に対し、スイングと道具の伸縮のリズムにおいて、一定の周波数にピークが表れている。一方、④非線形減衰振動子の場合は時間の経過に伴いピークが見られる周波数が遷移していることが分かる。

次に、スイングと棒の伸縮の関係を見るため、相互相関解析を行った。相関係数Rは式(4)により算出する。なお、 $x(t), y(t)$ はそれぞれスイングと棒の伸縮を示し、これらの波形が一致したときに相関係数Rが1になるよう、正規化の処理を施す。また、ズレ時間 Δt は0とした。

$$R(\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{\Delta t=1}^N x(t)y(t + \Delta t) \quad (4)$$

そして、相関係数の時間的変化を見るため、15[sec]の幅でサンプリングした波形間の相関係数を実験開始から終了まで連続して算出した。なお、①長さ一定の条件に対してはこの解析を行っていない。

相互相関解析の二例の結果を図5に示す。この結果をみると、②線形減衰振動子と③自己励起振動子では終始高めの結果が、④非線形減衰振動子においては時々刻々変化している様子が見られ、被験者Dにおいては、スイングが道具の伸縮に対して逆相になっている様子が見られた。最後にコメント調査の結果を表1に示す。

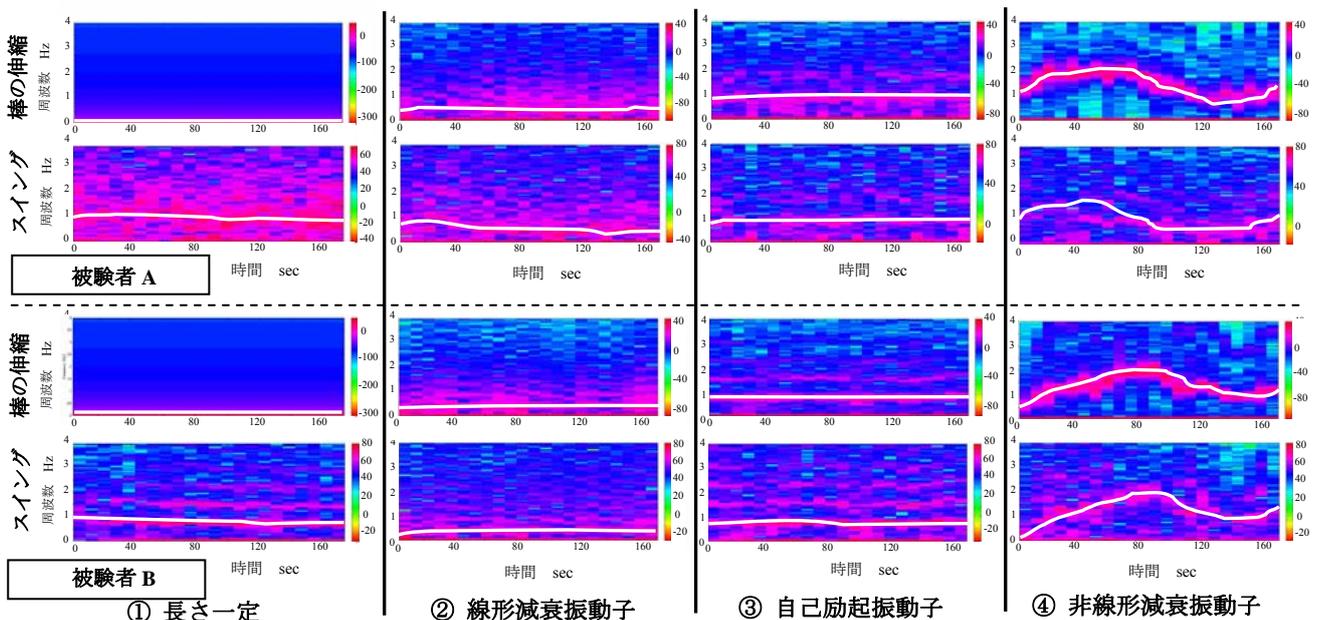


Fig.4 The result of STFT

図4. 短時間フーリエ変換解析の結果

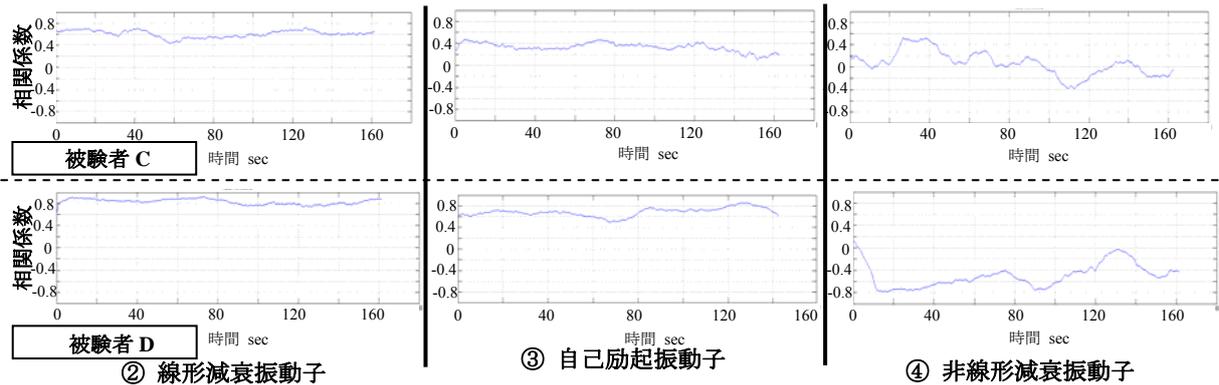


Fig.5 The result of cross-correlation analysis

図 5. 相互相関解析の結果

Table.1 Summary of comments

表 1 コメント調査の結果

①長さ固定
・時間が長く感じる
②線形減衰振動子
・タイミングが合うと心地いい ・自分で伸ばしている感じ, リアリティがある ・どこまで伸びるか分かりやすい ・棒が揺れているときはそれに合せて振ってしまう
③自己励起振動子
・合せるような, 振らされているような感じ ・変化があまりないので飽きる ・遅く感じる時がある
④非線形減衰振動子
・タイミングが合うと心地いい ・急に速くなったり遅くなったりするのが面白い ・タイミングを合せるのに集中する ・飽きない ・棒が揺れているときはそれに合せて振ってしまう

5. 考察

身体行為（スイング）と仮想道具のインタラクションについて各力学モデルにおける違いを、実験結果を踏まえて考察する。

まず、線形減衰振動子において、時間経過に対して比較的一定の周波数においてピークが現れ、かつ相互相関係数が高い値が持続したことは、スイングと仮想棒の伸縮が一定のリズムで終始同調していた傾向を示すものである。また「自分で伸ばしている感じ, リアリティがある」, 「どこまで伸びるか分かりやすい」というコメントは、仮想道具の伸縮の挙動を予測し易かったということが要因のひとつとして考えられる。

次に、自己励起振動子におけるスイングと仮想棒の伸縮の解析結果においては、周波数解析、相互相関解析共に、線形減衰振動子の結果との傾向の類似性がみられる。しかしながら、「変化があまりないので飽きる」, 「遅く感じた」といったコメントが報告されており、線形減衰振動子と異なった主観体験が生じている可能性があることから、この点についてはさらに検討する必要がある。

最後に、非線形減衰振動子においては時間経過に伴って周波数のピークや相互相関係数に変化する様子が見られた。非線形減衰振動子はカオス振動を起こすため、振るたびに伸縮の応答が異なり、それに合わせるように振るとさらに異なる応答を示す。この身体と仮想道具の反復により時々刻々と変化する多様なリズムが生成されたと推察できる。また、「急に速くなったり遅くなったりするのが面白い」, 「飽きない」といったコメントが得られ、このことはカオス振動する予測困難性や意外性と考えられていると考えられる。

6. まとめ

本研究では、道具使用者の周期的な手の振りに応じて、把持した道具の長手方向の長さが、様々な力学モデルに従って動的に変化する仮想道具システムを開発し、まずは手の振りと仮想道具の形状変化との身体的インタラクションのダイナミクスについて調査を行った。そして、実験の結果から線形減衰振動子と自己励起振動子では一定のリズムで振る傾向が見られ、非線形減衰振動子では時々刻々と変化するリズムが見られた。このことは身体動作をより多様化させる道具を設計するための手がかりを与えるものであると期待できる。

参考文献

- [1] Maravita, A. and Iriki, A.: Tools for the body (schema), Trends in Cognitive Sciences, Vol. 8-2, pp.79-86 (2004).
- [2] 久保, 上杉, 三輪 : 実体と仮想の影の統合による身体性の拡張インタフェース; 情報処理学会 第 66 回全国大会講演論文集(4), pp.21-22 (2004).
- [3] 渡辺, 小川, 三輪 : 影に着目した仮想道具表現による身体性拡張に関する研究, 第 3 8 回ヒューマンインタフェース学会研究会, Vol.8, No.2, pp.61-66, (2006)
- [4] 佐藤, 片山, 渡辺, 上杉, 三輪 : 仮想道具の実在感創出手法に関する研究-仮想影と可変慣性モーメントを統合した“Phantom Pole”の開発-, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2005, pp.71-74, (2005)