

身体全身の揺動を互いに共有する ロッキングインタラクショナルシステムの開発

柏木 亮^{*1} 林 慶徳^{*1} 上杉 繁^{*2}

Development of Rocking Interaction System to Share Each Whole-Body Swing

Akira Kashiwagi ^{*1}, Yoshinori Hayashi ^{*1} and Shigeru Wesugi ^{*2}

Abstract - Several researches focused on haptic interactions have advanced so far. Many of such interactive tools were designed for actions of specific body part such as upper arm. Therefore in our research, authors devised a novel interaction system for experiencing the same swings of whole-body with another person by focusing on a mechanism of a rocking chair which continually swings. Furthermore, performance tests and interaction experiments indicated a swinging capability of our interaction system and characteristics when two people utilized the system.

Keywords: Bodily interaction, Communication support, Entertainment, Whole-body swing and VR

1. はじめに

離れた相手と装置を介して握手をする^[1]ことや、手にした道具を互いが動かしあう^{[2][3]}など、力触覚に着目した様々なコミュニケーションツールの研究が進められてきた。それらの研究の特徴は、手や腕等の上半身一部の動き、あるいはそれらと個物とのインタラクションを対象としていた。一方著者らの研究グループでは、全身の動きの共有を目指し、二人の使用者がそれぞれの回転椅子に座り、重心の移動や足を動かして座面を回転させることで互いの椅子の動きを共有するというアイデアを実現した^[4]。ただし、椅子の動きによって全身の動きに影響を与えあうためには、少なくともいずれかの使用者が常に椅子を動かし続ける必要があった。

そこで本研究では、ロッキングチェアのように一度動かすと揺れが持続するような遊具の性質に着目した。そして、このような道具の動きを介して互いの身体の揺動を共有するというアイデアに基づき、2台の椅子の座面の揺れを互いに共有する新たなインタラクションシステムを考案したので報告する。

2. システム設計・開発

2.1 システム設計

互いの身体の揺動を、装置を介して共有させる方を最初に検討する上で、一度動かすと揺れがしばらく持続する性質を有する遊具である、ブランコやロッキングチェア

の揺れに着目した。ブランコは座面を吊るすために大きく頑丈な枠が必要であり、大きな場所を占めることになる。さらに、座面とその回転中心が離れているため必要駆動トルクが大きくなる。これと比較して、ロッキングチェアは座面の支持部が装置のフレームを兼ねるので小型に製作できる。また、座面とその回転中心が近く必要駆動トルクを小さく抑えられるので、座面の揺れを相手と共有させる機構としてロッキングチェアがより適切であると判断した。そこで、2台のロッキングチェアを木の板と金属棒で繋ぐことで、互いの座面の動きが一致するロッキングインタラクションのモックアップを作成した。二人の被験者にそれぞれの椅子に座り、揺動の共有を体験させたところ、常に利用者が座面を揺らし続けることなく利用可能なことや、相手の揺れが座面を通じて伝わることに對して不快なコメントなどもなかった。

以上を踏まえ、椅子の座面の角度を一致させて互いに揺れを共有するロッキングインタラクションシステムを開発することにした。上述のモックアップの寸法、動きを参考に、座面部大きさを横 700[mm]、奥行 600[mm]とし、人間を質量 70[kg]、座面と合わせた質量 100[kg]と想定した。実際にロッキングチェアを揺動させた際に計測した座面傾斜角度および傾斜角速度は $\pm 5[^\circ]$ 、 $40[\text{deg}/\text{sec}]$ であったので、目標最大傾斜角度および目標最大傾斜角速度は $\pm 15[^\circ]$ 、 $60[\text{deg}/\text{sec}]$ と決定した。

2.2 ロッキングインタラクションシステムの開発

2.2.1 構造設計

ロッキングチェアのような揺れる椅子の座面角度を互いに一致させることによって、それぞれの人の揺れに影響を与えるようなシステムを実現するためには、座面の

*1: 早稲田大学創造理工学研究所

*2: 早稲田大学理工学術院

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

*2: Faculty of Science and Engineering, Waseda University

角度を検出し、座面をアクチュエータで駆動する必要がある。しかし、ロッキングチェアに直接外力を加えることで揺動させる場合には、回転軸が存在しないので、座面の角度の正確な検出は困難である。ロッキングチェアを揺動させる機構はこれまでにいくつか提案されている。例えば、直接外力を加えずに、ロッキングチェアに取り付けた振り子を動かすことで、座面を揺動させるシステム^[5]がある。しかし、原理的にこの機構では正確な座面角度の制御が困難である。また、長方形のフレームに取り付けた二本のローラー上にロッキングチェアの曲率している足部を載せ、ローラーを駆動することによりロッキングチェアの任意の揺動を実現する機構^[6]も提案されている。しかしこの機構はローラーによる摩擦駆動であることと、ローラーが歯付きベルトを介してモータで直接駆動されることにより、正確に制御することと揺れを自立的に持続させることの実現が困難である。そこで図1に示す台形リンク機構を考案した。このリンク機構は、ロッキングチェアと同様に座面を揺らした際、座面が前後に傾き、また座面の仮想的な回転中心が床よりも下にある動きが再現可能である。座面と底面をつなぐ側板の下端に回転軸を組み込んだ機構により、角度計測が可能であり、さらに座面を揺動させるための回転運動が実現できると考えた。

また、人間の荷重を全てアクチュエータで支えるのは大きな出力が必要になるが、回転軸にカウンターバランスとしてねじりコイルバネを組み込むことによって、ロッキングチェアの揺れのような、一度揺らすと安定点をはさんで減衰しながら振動する動きの再現が可能であると考えた。

2.2.2 モータ駆動のみによる インタラクションシステム

最初に製作したシステムを図2に示す。ねじりコイルバネ (7.24Nm/deg) を側板の回転軸に2個取り付け、側板と回転軸はキー締結をした。このシステムでは DC ギヤードモータ (定格 8.8Nm, 100rpm), 回転型トルクセンサ (測定レンジ±5Nm) をモータの出力軸方向に一列に並べ側板の回転軸とカップリングで直接接続した。モータ出力軸に取り付けてあるエンコーダ値に基づいて位置制御を行う。座面を揺らすためには、DC モータを頻繁に正逆転制御する必要があるが、それに伴う逆起電力の負荷に、使用したモータドライバが対応しきれなかったため長時間の連続運転が不可能であることが判明した。

2.2.3 クラッチを組み込んだ インタラクションシステム

長時間座面を揺らす動作を実現するためには、モータは一定方向に回転させて急激な反転制御をさせずに、リンク機構の側板への駆動出力を正転、逆転する機構が必要である。そこで図3, 4に示す新たな機構を考案した。機構の原理として、まずはモータの出力を、正転方向と、

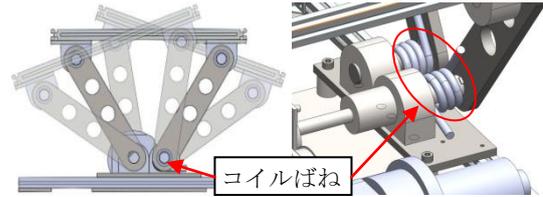


図1 台形リンク機構の軌跡と組み込まれたコイルばね
Fig.1 Tracks of a trapezoidal linkage and attached coil springs

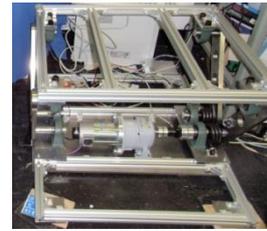


図2 モータ駆動のみによるインタラクションシステム
Fig.2 An interaction system driven only by a motor

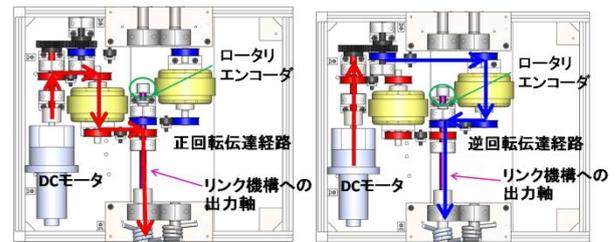


図3 正回転動力、逆回転動力伝達経路
Fig.3 Forward and backward torque transmission pathway

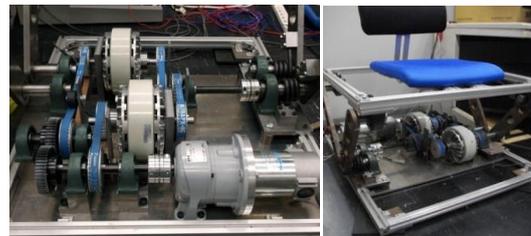


図4 正逆転機構とその機構を組み込んだ
インタラクションシステムの外観
Fig.4 Reciprocal rotation mechanism and appearance of interaction system

ギヤを介して反転させる方向の二系統に分ける。そして各方向の回転力を、独立に制御可能な二台のクラッチを介して、側板の1つの回転軸に入力する。この2台のクラッチのタイミングを合わせて制御することで、モータは常時一定回転した状態で側板を連続的に正逆転させ、椅子の揺動を実現する。クラッチには伝達トルクの制御が可能であること、入出力軸の回転数に差があるスリップ運転が可能であることを考慮し、パウダクラッチ (定格トルク 25Nm) を使用した。このクラッチにより、モータ側でトルク制御を行う必要が無く、使用者の座面の揺動が、パウダクラッチがスリップすることで高い減速比であっても阻害されることが無い。この機構ではモー

タの回転が座面の角度変化と一致しないので、出力軸にエンコーダ（出力パルス 1800P/R）を取り付け、座面の角度を計測できるようにした。

以上を踏まえ、図 5 に示す構成のシステムを構築した。PC 上で動作するプログラミングを作成し、A/D、D/A、カウンタ機能を有する I/O ボードを介して、エンコーダやパウダクラッチを駆動するパワーアンプと接続する。そして、相手の椅子の回転軸のエンコーダ値と自身の座面の角度位置が一致するようにクラッチを操作する制御を行う。

3. 性能試験・インタラクション実験

開発したシステムの基本性能、および制御パラメータの変化による、椅子の動きを共有するインタラクションへの影響を検討する実験を行った。今回は椅子の動きの挙動が異なる特徴を持つように、クラッチ制御に関するパラメータを 2 通りに設定した条件を対象とした。

3.1 性能試験

性能試験は、2 通りのパラメータを設定した条件（以下、設定 A と設定 B）において使用者の代わりに水を入れたポリタンク 4 個（合計 76kg）を座面に載せた状態で行った。二台の椅子それぞれに対して、制御の目標値としてステップ信号を入力する応答試験を最初に行った。その結果の一例を図 6 に示す。設定 A は無駄時間、時定数共に設定 B と比べ大きいことが確認された。また、設定 A は振動せずに素早く目標値に収束するのに対し、設定 B は大きく振動を繰り返しながら収束することが示された。

実際に使用者が動かす座面の周波数の範囲を調査するため、被験者に座面を速く動かす、あるいは遅く動かすよう指示した。その結果、0.4~0.7[Hz]の範囲で座面を動かすことが可能であることが分かった。そこで、0.1~1.5[Hz]の範囲において、制御目標値に 0.2[Hz]刻みの正弦波を入力する周波数応答試験を行った。その結果を図 7a、7b に示す。設定 A では 0.5[Hz]付近から振幅比が減少し始め、設定 B は 0.7[Hz]付近から減少し始める。位相差は設定 A,B 共に 0.5[Hz]付近から遅れが大きくなることを確認された。

3.1 互いの揺れを共有するインタラクション実験

互いの座面の揺れを共有するインタラクションにおける、座面の動きやそれを動かす感覚を調査する実験を行った。

実験環境としてお互いが見えないように 2 台のシステムの間にはボードで仕切りを設け、被験者は足を床に着け座面に座り行った。被験者がモータやクラッチの制御音で相手の動きを予測できないよう、ノイズキャンセリングヘッドホンを装着させ、ホワイトノイズを実験中に聞かせた。被験者に相手の椅子の揺れと自身の椅子の揺れが一致するように動かし続けるよう指示し、一致してい

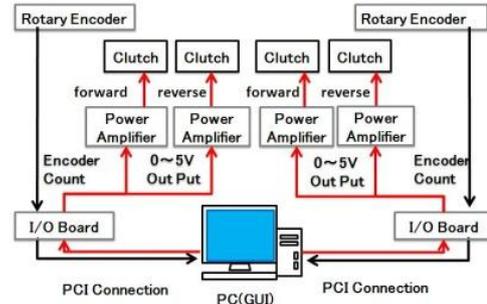


図 5 椅子の揺れと正逆転機構を制御するシステムの構成
Fig.5 System configuration to control swing of seat and reciprocal rotation mechanism

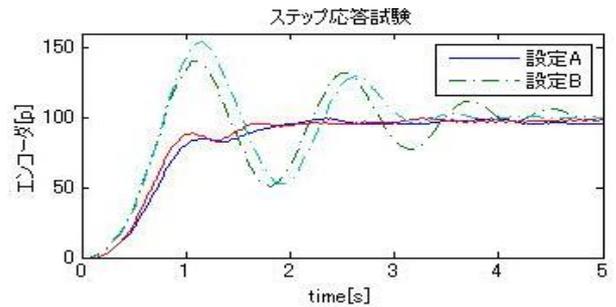
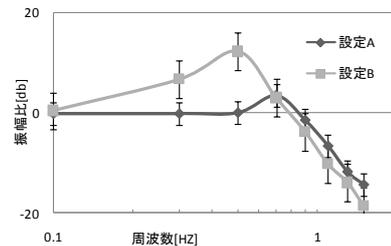
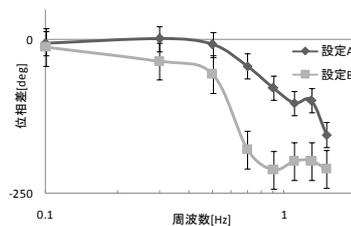


図 6 ステップ応答試験結果
Fig.6 Result of unit step response test



(a) 正弦波入力に対する周波数応答試験：振幅比
(a) Amplitude ratio of frequency response to sine wave



(b) 正弦波入力に対する周波数応答試験：位相差
(b) Phase difference of frequency response to sine wave

図 7 周波数応答試験の結果

Fig.7 Result of frequency response test

ると感じた間、手に持ったプッシュ式のスイッチを押し続けるよう要請した。実験中は、座面角度とスイッチを押しているか否かの信号を 1 台の PC に記録した。実験開始時は椅子とスイッチの操作に慣れてもらうため、いずれかの実験条件で一分程度練習をした。その後 3 分間実験をし、3 分休憩を設け、続けてもう一方の条件下で実験を行った。被験者が先入観を持たないよう、2 回の実験でどちらがどの設定かは伝えずに行った。被験者には実験終了後に椅子の揺らし方に関するコメントを答え

てもらった。被験者は健康な成人男子 22~23 歳 3 組 6 名であった。

図 8, 9 に, 6 名に共通したいくつかの揺れの特徴を示す。グラフ下部にはエンコーダの値を示し, 上部には揺れが相手と一致していると感じている状態を on として, 感じていない状態を off として示した値をのせた。設定 A では主に, 振幅・位相が共に合っている状態, あるいはそれがずれても動きが一致する様子が頻繁に観察された。一方, 設定 B では, 振幅がおよそ同じ範囲で位相が逆相にずれている状態, あるいはそれらのずれが持続する様子が観察された。

また被験者から得られたコメント結果を以下に載せる。

- ・相手に引っ張られて, 自分もそれに合わせている感じ
- ・大きい揺れの際はリズムカルで相手と同じと感じた
- ・一致しているのかわかりにくい
- ・あまりにも思った通りに動き抵抗が無いと逆に一致していないと感じる
- ・大きな変化が続くと一致していないと感じる
- ・ずれると抵抗感を感じる

4. 考察

揺れが一致していると感じている状態と, その時の座面の動きに関して考察する。まずは設定 A において, 図 8 左図で示した, 互いの椅子の動きが位相・振幅ともにほとんど一致している場面は, 他のデータでも頻繁に観察された。しかしながら, 動きの一致に関わらず, 一致しているという感じが必ずしも同時に生じ続けていないことが分かる。また図 8 右図では, 位相・振幅ともにずれているにも関わらず動きが一致していると報告している場面がみられる。

次に設定 B においては, 図 9 左図で示した, 椅子の動きの位相が逆相状態で続く様子が他のデータでも比較的観察された。また右図のように, 互いの椅子が全く異なって動く場合や, 位相・振幅が一致する場面も観察された。そして, 図 9 左図のように, 逆位相の椅子の動きが生じている場面において, 動きが一致している感じが同時に生じている様子が見られた。

今後さらにインタラクション実験を行い, そのデータを十分に検討する必要があるものの, こうしたデータの特徴として, 少なくとも椅子の動きの一致が必ずしも互いに一致しているという感じの持続と合致しているわけではないこと, そして, 異なる 2 つのパラメータ設定では, 椅子の動きの共有の仕方には異なる特徴が見られることから, それぞれにおいて一致していると感じている動きが異なる可能性があることが示唆される。

今後は, 椅子の動きの一致と, 一致していると感じることの共有に関する詳細な状況を調査するとともに, こうした動きの違いが生じているメカニズムを検討していきたい。

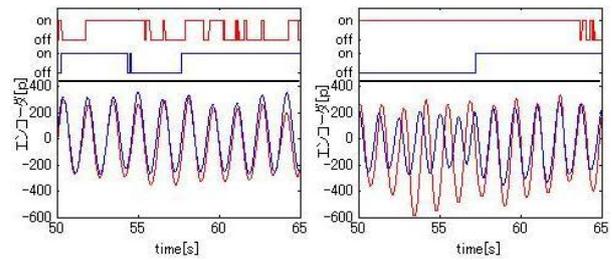


図 8 設定 A における座面角度の時間的変化
Fig.8 Seat angle of A setting in time domain

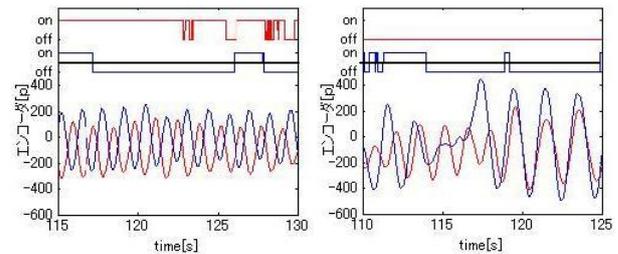


図 9 設定 B における座面角度の時間的変化
Fig.9 Seat angle of B setting in time domain

5. おわりに

本研究では身体全身の揺動に着目し, 座面の揺れを共有するインタラクションシステムを開発し, 制御パラメータの違いによる, 互いの揺れの共有や, 揺れの一致感に関する影響を調査した。今後は, 椅子の揺れの共有と, その時の揺れの共有の感覚の詳細を実験的に明らかにするとともに, 揺れを共有する新たな機構や制御方法についても検討していきたい。さらにはこうした身体の揺れの共有を, 例えば電話などの音声コミュニケーションと組み合わせることなど, コミュニケーションツールとしての可能性についても研究していきたい。

参考文献

- [1] Manorotkul,S., Kunii,Y., Hashimoto,H.: Tele-handshake Interface Based on Teleoperation with Time Delay; PEMC'96, Vol.3,pp.337-341 (1996).
- [2]Sekiguchi,D., Inami,M., Tachi,S.: RobotPHONE: RUI for Interpersonal Communication, CHI2001 Extended Abstracts, pp. 277-278 (2001).
- [3] Brave, S., Ishii, H. and Dahley, A.: Tangible Interfaces for Remote Collaboration and Communication; Proc. of CSCW'98, ACM Press, pp.169-178 (1998).
- [4] 上杉,宇野,三輪:身体的つながり感を強めあう回転椅子コミュニケーションシステムの開発;ヒューマンインタフェースシンポジウム 2005 論文集 2,pp.909-914(2005).
- [5] Fujimura, N.: Remote Furniture; <http://www.andrew.cmu.edu/user/noriyuki/artworks/remotefurniture/index.html> (1999).
- [6] 川島 豪:心地よい揺れに関する研究(アクティブロッキングチェアにおける心地よい揺れ);日本機械学会論文集,C 編,69 巻,677 号,pp.219-226 (2003).