

平成 21 年 6 月 8 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19500165

研究課題名（和文） 位相フィードバックを用いたロボットの適応的運動軌道生成

研究課題名（英文） Trajectory generation for adaptive motion by phase feedback

研究代表者

琴坂 信哉 (Kotosaka Shinya)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：30334147

研究成果の概要：

本論文では、入力信号から位相情報を抽出し、ロボットマニピュレータの運動軌道にフィードバックすることで様々な周期運動の位相および周波数を入力信号に対して同期させる手法を提案した。また、フーリエ級数近似式による運動軌道の多項式表現により任意の周期運動軌道の実現も可能とした。ロボットマニピュレータを用いた実験により、ステレオカメラシステムにより計測した人間の周期運動と同期した運動軌道の生成を確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：知能ロボティクス，マニピュレータ，運動制御，PLL，位相フィードバック，同期，協調作業

1. 研究開始当初の背景

人間は、感覚器官で取得した視覚情報や聴覚情報等に基づき、動的に変化する外部環境に合わせて容易に運動や作業を行うことができる。

特に、周期運動における位相同期能力に着目してみると、例えば、ダンスであれば流れる音楽の拍子に合わせて、行進であれば周囲を歩く人間の動きに合わせて同期した運動を行う等の例が多数見受けられる。このような

作業をロボットで実現するためには、センサで取得した外部信号への位相同期能力の実現が必要とされる。これまで、外部環境の変化に合わせて、運動軌道生成を行う手法の一つとして、カメラや力センサ等で得られた環境信号（例えば、作業対象物の位置や加速度、人間の動作）を目標状態として位置フィードバック制御を行うことで同期した運動を行うことが提案されてきている。しかし、この方法では、必ず観測の遅れを伴うため、同期

した運動を行うためには、何らかの目標状態の未来予測が必要とされる。例えば、Papanikolopoulosらは、観測対象の運動軌道をカルマンフィルタを用いて推定することで追従運動を実現している。また、Hongらは、カメラで計測したボールの軌道をもとに逐次最小二乗法を用いてボールの未来位置を予測し、投げられたボールのキャッチを行っている。しかし、これらの研究では、観測対象の運動を放物線軌道に限定しているため任意の運動への追従は困難である。また、畠山らは、指揮者が振る指揮棒の動きに調和したロボットによる打楽器演奏を行っている。この提案では、指揮棒の動きを計測し、その加速度から指揮棒の最下点を予測、ロボットのアクチュエータの動作のタイミングをそれに合わせている。この手法は、指揮棒の動きやロボットの動作への拘束条件が厳しいため、任意の運動を行う人間への追従や、任意のロボットの運動軌道生成は困難であると考えられる。これらとは別に、生物の運動軌道生成モデルの一つである神経振動子モデルを用いた外部環境への適応的な運動のメカニズムも提案されている。生物にとって歩行や遊泳等のリズム運動は、時々刻々と変化する環境や外乱に合わせて柔軟に適応できる必要がある。そこで、生物学的な立場からの研究、工学的な実現を目指した研究などが行われてきた。しかし、神経振動子モデルを用いた手法は、神経振動子モデルの厳密解を求めることが困難であることから、任意の運動軌道を設計することが非常に困難であるという問題点を抱えている。この問題点の解決のため、遺伝的アルゴリズム、強化学習法、見まね学習などを用いて適切なパラメータの設定が試みられてきた。しかし、任意の運動軌道の設計が困難、外部信号の信号波形への依存度が高いといった問題点は依然として残されている。また、Pomgasらは、新たな位相振動子を提案して、神経振動子モデルの場合と同様の外部信号との位相同期のメカニズムを提案しているが、希望する運動軌道を実現するための位相振動子のパラメータ設定にやはり困難を抱えている。

2. 研究の目的

本研究では、周期的な運動軌道生成に着目し、センサ等で取得した外部信号への位相同期制御手法の提案を行う。本手法では、位相フィードバックを用いることにより、位相同期を実現する。また、ロボットの目標運動軌道に、フーリエ級数近似を用いた多項式を用いることにより、任意の周期運動軌道の生成を実現する。

本手法は、多項式による目標運動軌道の記述と位相フィードバックというシンプルかつ一般的な手法の組み合わせにより構成さ

れているため、実装が容易で、様々な外部信号入力を許容する手法となっている。また、任意の位相差を持った運動の実現や入力された外部信号の周期の定数倍の周期への位相同期も実現できる非常に自由度の高い手法となっている。

3. 研究の方法

3.1 本研究における提案手法の概要

ロボットにとって与えられた作業目標を実現するためには、任意の運動軌道生成が可能であることが必要とされる。そのため、周期的な運動の位相同期には、「運動の周期と位相の制御」と「運動軌道の生成」を分離して独立に制御が可能にすることが望ましい。

Fig.1 に、本研究で提案する位相フィードバック手法の概念図を示す。

本提案手法は、環境情報等の様々な入力信号（ロボット自身が内部的に発生する信号も含む）の位相情報のみを取り出しフィードバックすることにより、様々な周期運動の位相を入力信号に一致させる。ロボットは、最初から自らの運動軌道生成のための運動軌道生成器を持っており、任意の目標運動軌道を設定することができる。Fig. 1では、人間のドラム打撃の運動軌道が、位相比較器に現在のロボットの目標運動軌道と合わせて入力され、両者の位相差が計算される。この位相差が小さくなるように、クロック生成タイミングを変更することにより、ロボットの運動の位相同期を行う。

また、目標とする運動軌道は、フーリエ級数近似を用いた多項式を用いることにより任意の目標運動軌道を実現する。

本手法の利点は、運動の振幅や軌跡を決定する運動軌道生成部分と入力信号への周期、位相の同期のメカニズムを分離して実装が可能である点にある。

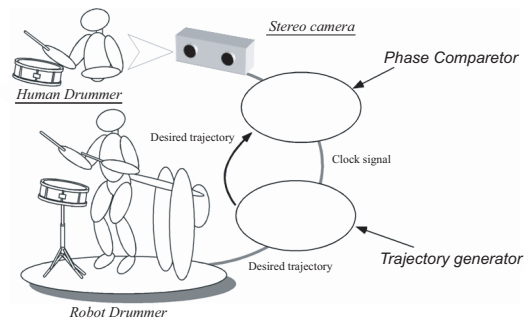


Fig. 1 位相フィードバックによるロボットマニピュレータの同期制御

3.2 位相フィードバックによる同期制御

本提案手法の信号の流れを Fig. 2 に示す。本提案手法は、大きく分けて環境情報入力部、PLL部、運動軌道生成部の三つの機能から構成される。

環境情報入力部は、入力された信号を必要に応じて前処理を行う。主に、ノイズ除去や波形整形などを想定している。環境情報入力部から出力される信号は、次の PLL 部の位相比較器に渡される。

PLL 部は、位相比較器、低域通過フィルタ、増幅器、積分器の四つの機能から構成されている。位相比較器では、環境信号入力部からの入力信号と後に述べる運動軌道生成部からの出力信号 $f_{fb}(t)$ が入力され、乗算により位相差信号を算出する。続いて、位相差信号は、低域通過フィルタにより高周波成分が取り除かれた後、増幅器により定数倍される。この増幅器の増幅率 K は、位相フィードバックのゲインである。増幅器の出力である位相差信号 $d\theta$ は、補正係数 a を加えて積分器に入力される。

最後に、積分器では、入力された信号を積分して目標位相 t を算出し、運動軌道生成部に渡す。

運動軌道生成部では、同期したい目標運動軌道の周期 T [sec] が指定される。

目標運動軌道の記述には、次節で述べるフーリエ級数近似による多項式 $f(t)$ を用いる。運動軌道生成部では、入力された目標位相 t に従って、目標運動軌道を多項式を用いて算出し出力する。最終的に、この出力が、ロボットの目標関節角軌道や目標手先軌道となる。また、運動軌道生成部の出力は、PLL 部の位相比較器にも出力されている。

本手法では、作業目的に合わせて外部信号に様々な信号入力を採用することが可能である。例えば、協調運搬作業や握手動作を実現するには、力センサや圧力センサの出力を用いたりすることができる。

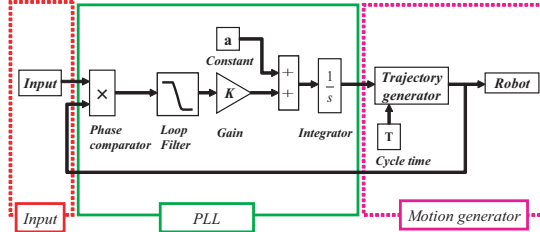


Fig. 2 本研究の提案手法

3.3 フーリエ近似式による目標運動軌道の多項式表現の提案

運動軌道生成部の目標運動軌道の記述には、次の式(2)に示すフーリエ級数近似による目標運動軌道の多項式表現（以降、フーリエ級数近似式と呼ぶ）を利用する。フーリエ級数の算出には、式(1)に示すように目標運動軌道のフーリエ級数展開を行う。そして、算出されたフーリエ級数を用いた多項式（式(2)）が運動軌道生成部の目標運動軌道となる。

本提案手法では、運動軌道生成器からロボットへの目標軌道の出力として、フーリエ級数近似式の算出結果 $f(t)$ を直接用いる。

そして、PLL 部の位相比較器へのフィードバックには、式(2)の基本波となる正弦波もしくは、基本波の 2 倍、3 倍... の周期を持つ正弦波である各次高調波（式(3)）を用いる。

このように、一部の高調波のみを抜き出して位相比較器に入力することにより、生成したい目標運動軌道と入力信号の波形が大きく異なっても位相の同期性能には大きく影響しないようにすることができる。さらに、高調波の次数に応じて入力信号の周期の定数倍の運動を生成することも可能である。また、式(3)における目標位相 ϕ を設定することにより、入力信号と任意の位相差を持った運動を生成することも可能である。これは、信号処理等による遅れの補正にも役立つと同時に、意図的に位相差を持った運動を行いたい場合にも有用である。

$$\begin{cases} A_n = \sum_{k=0}^{N-1} f_{traj}(k) \cos\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) \\ B_n = \sum_{k=0}^{N-1} f_{traj}(k) \sin\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) \\ (n = 0, 1, 2, \dots, N-1) \end{cases}$$

(1)

ただし A_k, B_k : フーリエ級数, N : 分割数,

$f_{traj}(k)$: あらかじめ与えられた目標運動軌道である。

$$\begin{aligned} f(t) = & A_0 + 2 \sum_{k=1}^{N-1} A_k \cos\left(\frac{2\pi}{T} kt\right) \\ & + 2 \sum_{k=1}^{N-1} B_k \sin\left(\frac{2\pi}{T} kt\right) \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 $f(t)$: 目標運動軌道となるフーリエ級数近似式, A_k, B_k : フーリエ級数, ($k=0, 1, 2, \dots, N-1$) : 次数, T : 周期, t : 目標位相（時刻に相当）である。

$$f_{fb}(t) = \cos\left(\frac{2\pi}{T} nt + \phi\right) \quad (3)$$

ただし、 $f_{fb}(t)$: 各次高調波, n : 各次高調波の次数, ϕ : 目標位相差である。

3.4 人間の腕振り運動を模擬した目標運動を用いたロボットマニピュレータの位相同期制御実験

(1)実験目的および実験装置

提案した位相フィードバックによる同期制御手法の有効性を検証するために、Fig. 3に示す平面3自由度マニピュレータを用いて同期制御実験を行った。ロボットの目標軌道には、あらかじめ計測しておいた人間の腕振り運動を平滑化した運動軌道を用いた。また、実験では、オンライン計測された人間の腕振り運動に同期を試みることにした。

人間の運動軌道の計測には、ステレオカメラ Bumblebee[Point Gray Research 社製]を用いて行った。計測の際には、被験者にカラーマーカを取り付け (Fig. 4)、3D Position Measurement SDK[株式会社ビュープラス社製]を用いて開発された3次元位置計測ソフトウェアを用いた。実験では、ロボットの目標運動軌道の水平方向は、一定の目標値を与えた。

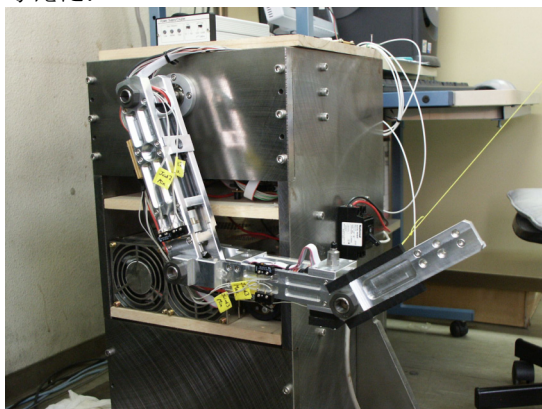


Fig. 3 平面3自由度マニピュレータ

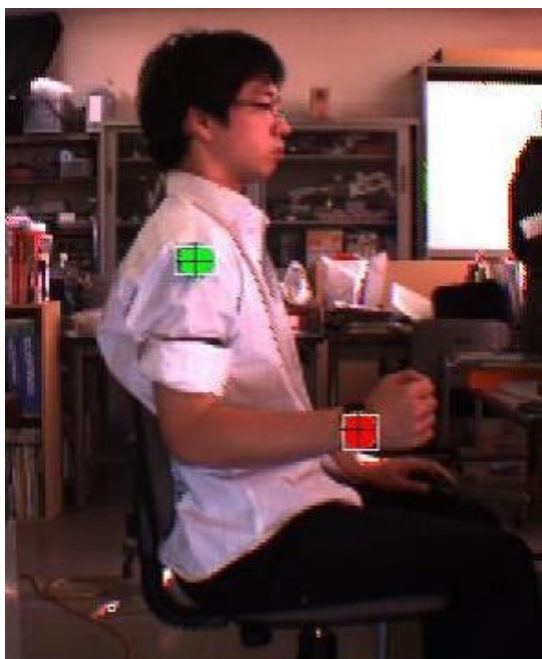


Fig. 4 カラーマーカをつけた被験者の計測結果

(2)実験条件

ロボットの目標運動軌道には、2[Hz]のメトロノームの音に合わせて腕振り運動を行わせた被験者の手先軌道を平滑化し、式(2)のフーリエ級数近似式において10次までの高調波を用いて記述した。なお、位相比較器へのフィードバック信号には、式(3)の $n=1$ の基本波を用いた。

同期制御実験では、被験者にメトロノームの音(周期 2[Hz])に合わせて腕を上下するように指示した。また、被験者は、ロボットの動きを見ないように実験装置を設置した。被験者には、実験の途中で運動の位相を約半周期分だけずらすように指示した。

本実験で使用したPLL部のパラメータは、Gain:2.5, Cycle time:0.5[sec], Constant:1.0である。

(3)実験結果

Fig. 5に計測開始から8[sec]後から15[sec]後までの人間の動作と実現されたロボットの運動軌道を示す。横軸は、時間[sec]、縦軸は、PLL部への入力信号である計測された人間の手首位置の鉛直方向成分[m]とロボットの手首位置の鉛直方向成分[m]である。実線が、実現されたロボットの運動軌道、点線が人間の運動を表している。

Fig. 5が示しているように、人間の腕振り運動は、周期や振幅にばらつきが見られる。8~11[sec]付近では、人間とロボットの動作が同期していることがわかる。また、11[sec]付近において実験前の指示に従い、被験者は腕振り運動の位相をずらしているのが確認できる。一旦、12[sec]付近で人間が動作の位相を変えたためロボットの動作も乱れるが、人間の新しい位相に合わせて同期がはじまり、位相をずらしても再同期がかかっていることが確認できた

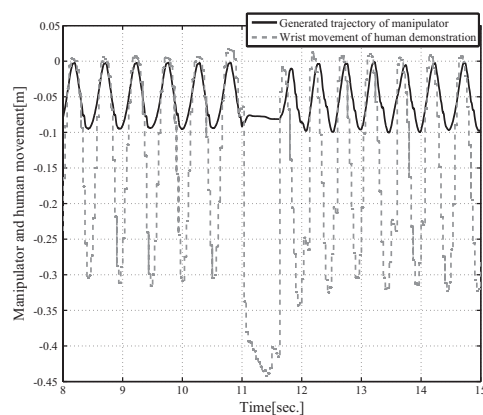


Fig. 5 位相同期実験 (ロボットと人間の運動軌道)

Fig. 6に生成されたロボットの運動軌道と

人間の腕振り運動の周期の変化を示す。運動軌道の周期は、それぞれの運動波形の最下点の時間を差分することにより求めた。Fig. 6の横軸は、腕を振った回数、縦軸は一振り一振りの時間間隔（周期）である。実線は、ロボットの、点線は人間の運動周期を表している。人間の動きが22振り目付近で大きくなっているが、これは事前の指示に従って被験者が意図的に運動の位相を半周期分ずらしているためである。

Fig. 6より、生成されたロボットの動作の周期は、人間の腕振り運動の周期にはほぼ一致することがわかる。また、実験を始めて2[sec]から10[sec]までの人間の腕振りの周期の平均値と標準偏差は、0.514[sec]、0.0169[sec]であり、同じ時間帯の実現されたロボットの運動軌道の周期の平均値と標準偏差は、0.512[sec]、0.0145[sec]であった。さらに、被験者が位相をずらした後の14[sec]から30[sec]の間の人間の腕振りの周期の平均値と標準偏差は、0.512[sec]、0.0204[sec]であり、同じ時間帯の実現されたロボットの運動軌道の周期の平均値と標準偏差は、0.511[sec]、0.0204[sec]であった。

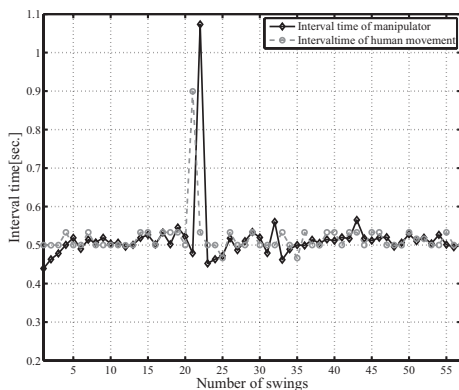


Fig. 6 ロボットと人間の運動周期の変化

Fig. 7に、人間の腕振り運動と実現されたロボットの運動軌道の最下点の時間間隔をプロットしたものを示す。Fig. 7の横軸は、腕を振った回数、縦軸が両者の運動の最下点の時間間隔を表している。これは、人間の腕振り運動と実現されたロボットの運動軌道の位相差を表している。

実験を始めて2[sec]から10[sec]までの時間間隔の平均値と標準偏差は、-0.00156[sec]、0.0147[sec]であった。また、被験者が位相をずらした後の14[sec]から30[sec]の間の時間間隔の平均値と標準偏差は、-0.01941[sec]、0.0189[sec]であり、2つの運動の位相差は、ほぼ0[sec]に一致することがわかる。

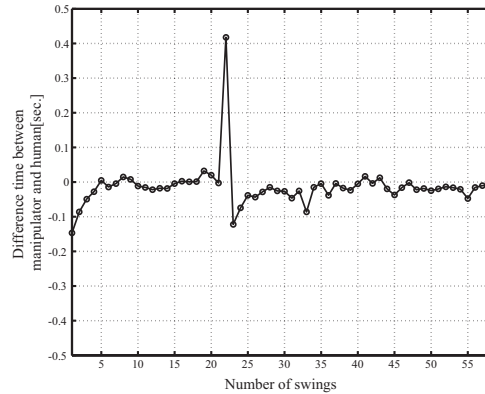


Fig. 7 ロボットと人間の運動の位相差の変化

以上の結果をもって人間の周期運動と実現されたロボットの運動が同期していることが確認できた。

4. 研究成果

本論文では、動的に変化する外部環境に合わせた運動軌道生成を実現するため、位相フィードバックを用いたマニピュレータの位相同期制御手法の提案を行った。そして、本手法を用いることで、ステレオカメラにより計測された人間の周期運動軌道との位相同期を平面3リンクマニピュレータにて実現した。実験結果より、本手法は、指定した位相差を持った運動の実現や入力された外部信号の周期の定数倍の周期への位相同期も実現できる自由度の高い位相同期制御手法であることも示した。

本提案手法は、入力信号が周期的なものであれば、いかなる信号にも適用できる。今回はステレオカメラで捉えた人間の動作であったが、ドラム打撃音のような音響信号でも対応可能である。それに加え、様々な運動軌道をフーリエ級数近似式で記述することで、任意の運動軌道が実現可能であること、さらに指定した任意の位相差を作り出すことも可能であるという利点を持っている。これによって、人間とのドラム演奏の共演や人間の動きに合わせてダンスをするなどの協調動作を実現できると考えている。

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)

[雑誌論文] (計1件)

(1) Takayuki Ubukata, Shinya Kotosaka, and Hideyuki Ohtaki, Trajectory Generation for Adaptive Motion by Phase Feedback

- Synchronization of Multicycle Human Movement -, Journal of Robotics and

Mechatronics, 査読あり, Vol. 21, No. 3, pp. 342-352, 2009.

〔学会発表〕(計3件)

(1) 琴坂信哉, 生方崇之, 大滝英征, 位相フィードバックによるロボットの適応的運動軌道生成-ゲイン制御による動きの一部が不可視のターゲットへの同期-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'09, 2008.5.26, 福岡 福岡国際会議場.

(2) 生方崇之, 琴坂信哉, 大滝英征, 位相フィードバックによるロボット適応的運動軌道生成 -複数周期を持つ運動同期-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'08, 2008.6.5, 長野 ビックハット.

(3) 生方崇之, 琴坂信哉, 大滝英征, 位相フィードバックによるロボット適応的運動軌道生成, 第25回日本ロボット学会学術講演会, 2007.9.14, 千葉工大 津田沼キャンパス.

〔その他〕

(1) 企画展 最先端技術 in さいたま, さいたま市青少年宇宙科学館, 2008.11.22 ~ 2009.1.18.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

琴坂 信哉 (Kotosaka Shinya)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 30334147