社交ダンスにおける人間とロボットとの 力学的相互作用型協調運動システム

竹 田 貴 博* 林 智 大* 平 田 泰 久* 小 菅 一 弘*

Human-Robot Cooperation with Physical Interaction for Ballroom Dance

Takahiro Takeda*, Tomohiro Hayashi*, Yasuhisa Hirata* and Kazuhiro Kosuge*

A main purpose of our research is realizing an effective human-robot cooperation with physical interaction. In this paper, an architecture for the cooperation is proposed. As an example of the cooperation, ballroom dancing by a human and a robot is focused. And a dance partner robot referred to as “MS DanceR(Mobile Smart Dance Robot)” is developed. MS DanceR realizes a ballroom dance together with a human based on a control architecture referred to as “CAST(Control Architecture based-on Step Transition)”, which is designed according to features of ballroom dances. Experimental results illustrate the validity of MS DanceR and its control architecture CAST.

Key Words: Human-robot Cooperation, Physical Interaction, Ballroom Dance, Mobile Robot

1. は じ め に

社会の少子高齢化や労働力の減少が切実な問題になりつつあり、この問題の解決策の一つとして、生活環境下でのロボット技術の利用が期待されている。生活環境下でロボットを利用するには、人間との共存・協調を前提としたロボットシステムの開発が不可欠であり、そのためには、協調する人間への適応や、複雑な作業環境への適応が必要となる。人間とロボットの高度な協調を実現するために、人間同士の協調作業について考えてみると、人間同士は、互いの状態や意図の推定、次に相手が行うであろう運動の予測、時々刻々変化する環境の認識、経験による作業知識・技能の習得・向上等に基づいて自ら行動し効果的な協調作業を行っている。もし、ロボットがこの人間同士に見られる協調のように、作業相手や環境の状態の推定、作業知識の習得等に基づき、能動的かつ適応的に実時間で協調行動を行うことができれば、高度でかつディペンダブルな人間協調型ロボットシステムを開発することが可能となるであろう。

従来、人間とロボットの協調に関しては、様々な制御システムが提案されている [1]~[3] が、それらの制御系のほとんどは、ロボットに搭載された力覚センサからの情報に基づいてロボットが運動を生成するもので、人からの働きかけに対して、ロボットの運動を受動的に生成するものである。また、近年、人間の意図を推定し協調ハンドリングを実現する研究も行われている [4] [5] が、協調ハンドリングにおける軌道推定のみを考慮しており、上

記のような人間同士の力学的相互作用に基づく協調問題に関する議論はほとんど行われていない。

その他、人間とロボットとの相互作用において、能動的に行動するロボットの研究が、いくつか行われている [6]~[8]。これらの研究は、状況に応じて状態が変化する内部モデルを持つことで、ロボットは外部の環境からの情報だけでなく、内部の状態から生じる目標に従って行動することが可能である。しかし、このような研究は、ペットロボットのようなエンターテインメント性や癒しを考慮したものが多く、人間との力学的な相互作用に基づき能動的かつ適応的な協調作業を実現するという問題は考慮されていない。

そこで本研究では、能動的かつ適応的な協調運動の一例として社交ダンスを取り上げ、力学的相互作用を伴う人間とロボットのための新しい協調アーキテクチャを提案するとともに、実際に社交ダンスを踊るロボットを開発することにより、その有効性の検証を行う。以下、本論文では、第 2 章で力学的相互作用に基づく人間とロボットの協調運動を実現するアーキテクチャについて提案し、第 3 章では、そのアーキテクチャに基づく協調の一例としての社交ダンスについて考察し、人間と社交ダンスを踊るロボットのためのハードウェア・コントロールアーキテクチャを設計する。そして、第 4 章では社交ダンスのワルツに着目し、コントロールアーキテクチャをロボットに実装する。最後に、第 5 章では人間・ロボット間の社交ダンス実験を行うことで提案したロボットシステムの有効性を検証する。

2. 力学的相互作用に基づく協調運動アーキテクチャ

日常経験する人間同士の協調作業では、お互い相手や環境の

原稿受付 2005 年 11 月 29 日

*東北大学

*Tohoku University

状態を常に観測・推定・予測し、従来のロボット同士やロボットと人間との協調運動に比べて、非常に高度な協調を実現している。このような協調運動は、いわゆる“阿吽の呼吸”と言われるようなパートナー間における究極の協調の一つであると考えられる。そこで、このような人間協調型ロボットシステムを研究開発するため、本研究では以下に示す三つの問題に注目する。

一つ目は対象とする運動・作業に関する知識をロボットに持たせることである。二つ目は、その知識とロボットが得ることができる人間や環境の情報から、人間の意図する行動を推定することであり、三つ目は推定結果と運動・作業知識およびリアルタイムに変化する人間の状態に基づいて、相手に合わせた適切な協調運動を実現することである。

例えば、2人で一つの物体を協調搬送することを考えた場合、一方の作業者が自分の意図する搬送先に基づいて物体へ操作力を加え、それと同時に、他方の作業者はその力学的相互作用や作業に関する知識に基づいて相手の意図する搬送先や進行方向などを推定することができる。そして、物体搬送中はその目標に向かって互いが能動的に運動しつつ、相手の運動に合わせるように自分の運動を変化させることによって、結果的に作業を実現している。

そこで、本研究ではこのような人間とロボットとの高度な協調運動を実現する枠組みとして、「作業知識 (Knowledge of Tasks)」, 「意図推定 (Estimating Human's Intention)」, 「協調運動生成 (Cooperative Motion Generation)」という三つの点に注目し、それらによって構築される **Fig. 1** に示すようなコントロールアーキテクチャを設計する。しかし、通常このようなコントロールアーキテクチャを設計しても、限られた情報しか得ることができないロボットシステムを用いて複雑な協調運動を実現することは困難である。そこで本論文では、ある限られた運動の中で、人間とロボットが互いに能動的かつ適応的に協調を実現するロボットシステムとして、**Fig. 2** に示すような社交ダンスを人間と踊ることのできるロボットシステムに注目する。

社交ダンスを実現するためのロボットシステムの研究開発は、エンターテインメント性のみが強調されるおそれがあるが、一方で、社交ダンスではそのルールが決まっており、そのルールやパートナーの運動状態によって相手の意図を推定することによって次に踊るべきステップを推定し、かつそのステップ運動中には相手に合わせた適応的かつ能動的な運動が必要となる。すなわち、社交ダンスは、人間とロボットの協調運動メカニズムを研究するためには非常によい題材であると考えられる。

本研究成果は人間との力学的な相互作用に基づき能動的かつ適応的に実現される多くの協調作業へ応用することが可能である。その例として、例えば、先に述べたような物体の協調搬送を人間と行うロボットにおいて、物体を通して伝達される力情報に基づいて人間の意図する搬送先などを推定し、そのための搬送作業を能動的かつ人間に合わせて実現できると考える。次に歩行器を挙げると、人間との相互作用力に基づいて、椅子の立ち座りの支援や転倒の防止、怪我などにより通常歩行が困難な人のための歩行の支援などに活用できると考える。さらには、高齢者の寝たきり予防のための離床（起き上がりから立ち上がり

Fig. 1 Architecture for human-robot cooperation with physical interaction

Fig. 2 Ballroom dancing by human and robot

り)を支援するベッドシステムなど、人間との力学的なインタラクションを含む多くの協調作業システムに本研究成果を応用できると考える。

3. 人間とロボットによる社交ダンスの実現

本章では、前章で提案した協調運動アーキテクチャに基づき、社交ダンスを実現するためのコントロールアーキテクチャを設計することを考える。そこで、初めに社交ダンスの特徴について考え、そのような特徴に基づき協調運動を行うことができるダンスパートナーロボットを紹介する。そして、その社交ダンスの特徴やロボットのハードウェアに基づいたコントロールアーキテクチャを設計する。

3.1 社交ダンスの特徴

社交ダンス [9] にはワルツ、タンゴ、ルンバなどがあり、その種類は数多く存在する。しかしながら、その中心となる規則や特徴の多くは共通している。まず、おのおのの社交ダンスには、それぞれ特有のステップが存在する。ここでステップとは、連続した足の運びから構成されるある程度決められた運動である。ステップの例を **Fig. 3** に示す。おのおのの社交ダンスに含まれるステップの数は、基本的なステップだけでも 10 種類以上、すべてのステップを含めると 20 種類以上存在するが、最低五つ程度のステップを知っていれば、単調ではあるが音楽に合わせて、ダンスフロアを踊り続けることができると言われている。

一般的に社交ダンスでは、一つのステップを踏み終えた後、次に踊るステップは決定しておらず、男性が女性をリードすることによって、ステップの切り替えが実現される。つまり、遷移可能なステップが数多く存在する中で、女性側は主に男性側か

Fig. 3 Example of dance steps (Natural Turn in waltz)

ら伝わるリードを推定し、次のステップを自分の中で決定するのである。そして、次のステップを決定する瞬間は、現在踏んでいるステップの終了時であると考えられる。ここでリードとは、例外を除き多くの場合、男性が女性に加える力情報である。例外としては、男性の運動から女性が取得する視覚情報があり、男女間の接触がない（双方が離れる）様式の社交ダンスに用いられる。力学的協調運動について議論する本論文では、リードが男女間の相互作用力のみである様式の社交ダンスを取り上げる。

またダンスを華麗に踊るためには、男女のペアで行うステップ運動は、息を合わせた協調運動でなければならない。つまり、パートナー間の身長、体型の相違やその個人特有のステップの癖等をお互いに考慮しつつ、ステップの歩幅と足の速度を変化させる必要がある。

このような社交ダンスの特徴をまとめると以下ようになる。

- 各ダンスは複数のステップで構成される。
- ステップの切り替えは男性のリードによる。また、そのリードは主にパートナー間に働く力情報によって伝えられる。
- ステップ運動中の歩幅、速度は互いに相手に合わせるように変化させる。

3.2 ダンスパートナーロボット：MS DanceR

社交ダンスでは、男女のペアが互いにホールド態勢をとり、姿勢を安定させながらステップ運動を実現する。したがって、ロボットも人間と同じような形をし、かつ、人間の足の運動を妨げないような踊りやすさを考慮した構造が求められる。また、ダンスフロアを回転、並進移動しながら縦横無尽に運動するためには、あらゆる方向に運動することのできる移動機構が有効である。その他、社交ダンスを踊るためには、男性のリードに基づいて女性は踊るべきステップを推定する必要がある、かつ、ステップを踏んでいるときには体格によって異なる歩幅を考慮した協調運動が必要となる。そのためには、パートナー間に働く力情報が必要不可欠である。

そこで、本研究では、上記のような指針に基づき、Fig. 4(a)に示されるようなダンスパートナーロボット MS DanceR (Mobile Smart Dance Robot) を開発した。MS DanceR は、社交ダンスにおける人間の複雑な運動に追従できるように、四つのローラホイールから構成される全方向移動機構を持つ。また、Fig. 4(b)のように人間がロボットと組み合い、人間はホールド態勢すなわち両手と腰を接触させながら上半身を固定させ、ロボットに力/モーメントを加える。そして、ロボットの上半身全体に作用する力情報を計測するために、ロボットの上半身と下半身の間に 6 軸力覚センサを搭載している。

(a) Robot structure (b) Interaction with human

Fig. 4 Dance partner robot: MS DanceR

3.3 コントロールアーキテクチャの設計

3.3.1 社交ダンスのモデリング

本項では、Fig. 1 に基づいた社交ダンスを実現するためのコントロールアーキテクチャを設計することを考える。3.1 節で述べた一般的な社交ダンスの特徴から、社交ダンスのモデリングを行う。まず、一つ目の特徴より、ロボットは複数存在するステップについて知識を持たなければならない。ステップについての知識とは、各ステップにおける足の運ぶ順番、基本的な移動距離や体の回転変位の情報、および各ステップ間の遷移関係である。この足を運ぶ順番や体の変位を Step Motion、ステップ間の遷移関係を Step Transition としてモデル化する。これら二つは、社交ダンスの中心的な知識となる部分であるため、まとめて Knowledge と呼ぶことにする。

次に、二つ目の特徴から、女性側の役割を担うロボット MS DanceR は人間からのリードに基づいて、ステップを切り替えるなければならない。このため、ロボットは現在踊っているステップを終えたのち、男性のリードから男性の踊りたいステップいわず人間意図を推定する必要がある。この女性側のステップ推定を Step Estimator としてモデル化する。

最後に、三つ目の特徴からロボットは人間と協調し、適応的かつ能動的なステップ運動を実現しなければならない。ステップの歩幅や速度は基本的には決まっているが、多少の個人差が存在する。例えば身長の高い人と低い人では、当然その歩幅、速度は変化するであろう。また、人の密集したような場所や壁による影響など、ダンスフロア的环境によってもそれらは変わってくる。そのため MS DanceR は、ただ単に Step Motion からの基本的なステップ運動軌道にのみ追従するのではなく、パートナー間で息の合わせた運動を生成する必要がある。このステップ運動生成機構を Motion Generator としてモデル化する。

3.3.2 コントロールアーキテクチャ：CAST

本研究では、このようにモデル化されたモジュールに基づいて構築されたダンスパートナーロボットのためのコントロールアーキテクチャを CAST (Control Architecture based-on Step Transition) と呼び、Fig. 5 に示すような構成とする。CAST において MS DanceR はまず、センサからの情報を通して得られた外界および内界の状態を Step Estimator および Motion Generator に伝達する。具体的にセンサからは、エンコーダにより得られたロボットの自己位置、およびカセンサから得られた人間からの操作力が情報として伝達される。Step Estimator では、社交ダンスの知識が格納されている Knowledge 内の Step Motion, Step Transition を参照し、ロボット自身の行動を推

Fig. 5 Control architecture: CAST

定・決定する。このとき、ロボットは男性により加えられたリード情報と、社交ダンスのルールとを照らし合わせ、一つのステップを推定する。

Motion Generator では、Step Estimator によって推定・決定されたステップの基本運動軌道、およびセンサから計測された人間との相互作用に基づいて、パートナー間が息を合わせるように運動が生成される。Motion Generator によって生成された運動は、ロボットの運動学に基づいて各アクチュエータへの指令値が計算されて出力される。ロボットが以上のようなアーキテクチャを持つことにより、人間と協調した社交ダンスを実現することができる。

4. ワルツにおける CAST の設計

本研究では、CAST を MS DanceR に実装するために、社交ダンスの中からワルツを選択し、ワルツを実現するための各モジュールを設計する。ワルツは、3 拍子のリズムで踊る最もポピュラーなダンスの一つであり、日本語で円舞曲とも書くように、その運動は体の回転を含み、様々なバリエーションの動きから成る。通常、ワルツのステップの数は 10 種類以上存在するが、本研究では議論を簡単にするために、基本的なステップであるクローズドチェンジレフト (Closed Change Left; 以下, CCL), クローズドチェンジライト (Closed Change Right; 以下, CCR), ナチュラルターン (Natural Turn; 以下, NT), リバースターン (Reverse Turn; 以下, RT), スクウェアターン (Square Turn; 以下, ST) の五つを取り上げる。この五つのステップを組み合わせることにより、ダンスフロアを連続的に踊ることができる。

4.1 Step Motion

おのおののステップの基本的な運動軌道を得るために、モーションキャプチャシステム VICON460 を用いて人間のステップ運動を計測した (Fig. 6)。社交ダンスには平面内の運動だけでなく、体の上下運動を含めた三次元的な様々な運動が存在するが、本研究では、社交ダンスの実現に最低限必要な平面内の運動に着目し、計測したデータを補間することで、ロボットに与えるステップの基本運動軌道を生成した。ロボットの運動に関する座標系を Fig. 7 のように定義したときの、生成されたステップの平面内の運動軌道 (x, y, θ) を Fig. 8 に示す。また、個々のステップ運動の所要時間は社交ダンスの際に流れる音楽の速さにより異なるが、本論文では音楽の速さは一定であり、か

Fig. 6 Step motion analysis using motion capture system

Fig. 7 Coordinate system for robot motion

(a) Displacement along x, y axis (b) Rotation around z axis (θ)

Fig. 8 Step trajectory of Natural Turn

Fig. 9 Step Transition of waltz

つ、既知であるという前提の下、ステップ運動の所要時間を既知としている。

4.2 Step Transition

社交ダンスには、ステップの最後に使用する足に対して、逆の足で次のステップを始めるというルールがある。例えば、ステップ CCL の最後に使用する足は左足であるために、次のステップは右足から始めるステップに制限される。このルールを各々のステップに適用することで、ステップの遷移関係を構築することができる。本研究で着目するワルツの五つのステップの遷移関係 (Step Transition) を Fig. 9 に示す。Step Transition は次に踏むステップを推定する際に参照される。

4.3 Step Estimator

4.3.1 社交ダンスにおける男性のリード

社交ダンスは、男性側のリードおよびステップの遷移関係に基づいて女性側が次のステップを推定し、切り替えることによって実現される。本研究では、男性のリードは、ステップ遷移の際

Fig. 10 Force/moment measurements at transition

に男性が女性に加える力情報により伝達されるものと考え、ステップ遷移の瞬間に次のステップを推定する。したがって、Step Estimator を設計するに当たり、まずワルツにおけるリード、すなわちロボットに加えられる力情報を解析する必要がある。

この力情報を解析するために、あらかじめ設定したステップの順番に従って、実際に人間がロボットと社交ダンスを踊り、その際の力情報をロボットに搭載したセンサから計測した。ステップ CCL からステップ NT へ遷移する際の計測結果を Fig. 10 (a), (b) に、ステップ CCL からステップ ST へ遷移する際の計測結果を Fig. 10 (c), (d) に示す。Fig. 10 に示すように、あるステップから遷移可能なおのおののステップのリードにはそれぞれ特徴がある。これらリードの特徴は、各ステップの最初の運動方向に大きく影響を受けるものである。例えば、ステップ NT はロボット座標 z 軸回りの負方向への回転運動から始まるステップであるため、リード時はその回転方向のモーメントが大きく作用する。また、ステップ ST はロボット座標 y 軸の負方向への並進運動から始まるため、その方向の力が大きく作用する。

4.3.2 ステップ推定手法

このような特徴を解析し、人間の意図するステップを推定するために、本研究では三つの方法に注目し、それぞれを設計し、実験において比較を行う。一つ目の方法は、力の閾値に基づく Production Rule を用いた Step Estimator である。二つ目の方法は、おのおのの人間の特徴に合わせたステップ推定が可能となるように、おのおのの人間の力情報のパターンをニューラルネットワーク (Neural Network; 以下, NN) [10] により学習した Step Estimator である。これら二つの手法はどちらも、ステップが遷移する瞬間の値に注目し、その変化に基づいて推定を行うものである。Production Rule では、おのおのの人間の特徴に基づき設定した力情報の閾値を用いた。一方, NN を用いた手法では、人間に加える力情報に基づいて NN のパラメータを学習することができるため、踊る人間に適応しより高い精度の推定が期待できる。

さらに、三つ目の方法として、時系列情報を扱うことができる

Fig. 11 Step Estimator using HMM

Fig. 12 Motion Generator

隠れマルコフモデル (Hidden Markov Model; 以下, HMM) [11] を用いて、人間の加えるリードの時間的変動を学習することができる Step Estimator を設計した (Fig. 11)。人間同士のダンスを考えたとき、女性がある瞬間における男性のリードを感じ取り、ステップを推定するという事は考えにくく、また、このような限られた情報のみでは、正しいステップの推定は困難であると考えられる。むしろ、ステップの遷移およびその直前における男性のリードの時間的変動から、女性はステップを推定すると考えた方が自然である。

そこで、前者二つの方法と異なり、ステップ遷移の瞬間だけでなく、その直前の力情報も考慮することで、次のステップを推定することが可能な Step Estimator を設計する。このとき Step Estimator は、時系列データの特徴を抽出する Feature Extractor, 特徴ベクトルと時系列モデルからステップ推定の指標値を出力する Calculator (HMM によって構成される)、ステップ遷移の瞬間に指標値を基に次のステップを出力する Evaluator の三つから構成される。

4.4 Motion Generator

社交ダンスでは、男女のペアがお互いに息を合わせた協調運動を行う必要がある。本研究では、この協調運動は二つの運動の組み合わせによって実現されたと考え、ロボットの運動生成機構 Motion Generator を設計する。まず、その一つ目の運動とは Step Motion から得られる基本的なステップ軌道に追従する能動的な運動である。そして、二つ目の運動はパートナー間の相互作用力に基づいて生成される適応的な運動である。つまり、この二つの運動が同時に実現できれば、相手と優雅な社交ダンスのステップを踏むことが可能となる。

本研究では、Fig. 12 に示すように、Step Motion から得られる基本的なステップ運動の速度 $\dot{x}_h (\in \mathbf{R}^3)$ と、ロボットに作用する外力/モーメント $F_{\text{sensor}} (\in \mathbf{R}^3)$ に基づいて生成されるパートナーとの協調運動を実現するための速度 $\dot{x}_f (\in \mathbf{R}^3)$ の二つにより、ロボットの目標速度 $\dot{x}_d (\in \mathbf{R}^3)$ を生成する。すなわち、ロボットの目標速度 $\dot{x}_d$ は式 (1) で表される。

$$\dot{x}_d = A\dot{x}_h + \dot{x}_f \quad (1)$$

Fig. 13 Experimental result

ここで、 $A(\in \mathbf{R}^{3 \times 3})$ は、スケーリングファクタ行列である。 $\dot{x}_h$ は基本的なステップ運動であり、モーションキャプチャシステムにより計測された一個人のステップデータにより生成される。そこで、スケーリングファクタ行列 A を変化させることで、人間の体格、周囲の環境、音楽のリズム等が変化した場合においても適応した運動が可能となる。また、 $\dot{x}_f$ は式 (2) の特性を満たすように設計される。

$$M\ddot{x}_f + D\dot{x}_f = F_{\text{sensor}} \quad (2)$$

ここで、 $M(\in \mathbf{R}^{3 \times 3})$ は慣性行列、 $D(\in \mathbf{R}^{3 \times 3})$ は粘性行列である。

5. 実験

本章では、提案した力学的相互作用に基づく人間とロボットの協調運動アーキテクチャの有効性を検証するために、人間とロボットによる社交ダンスを踊る実験を行った。本実験では、社交ダンスの経験のある者が被験者となり、ロボットとの社交ダンスを実現した。実験の様子を Fig. 13 に示す。

5.1 ステップ推定実験

力情報から人間の意図を的確に推定できるかを確認するために、Production Rule, NN, HMM の三つの手法を用いた実験を行った。実験では、被験者はステップの系列 CCL → NT → CCR → RT → CCL → ST → CCL → CCR → CCL とステップの系列 NT → NT → ST → RT → RT の二つを順番にロボットとともに踊ろうと試み、ロボットは被験者の加えるリードに従って次のステップを推定する。またロボットが被験者の意図するステップを推定できない場合は上記のステップ系列を中止する。このような実験をそれぞれ 15 回ずつ繰り返し行った。実験結果を Table 1 に示す。ここで、Table 1 における Trials はステップ推定を行った回数、Success は成功した回数、Failures は失敗した回数を意味している。

Production Rule, NN, HMM の三つの手法の有意差を確認するため、ステップ推定の成功率を基に検定を行う。本実験のように、対象とするそれぞれの手法をそれぞれの被験者に滞りなく実施する場合、有意差の検定には Paired-Sample t Test [12] が用いられる。Paired-Sample t Test では、被験者 i における

Table 1 Experimental results of step estimation

(a) With Hidden Markov Model

	Trials	Success	Failures	Success Rate
Subject A	178	176	2	98.88 [%]
Subject B	155	145	10	93.55 [%]

(b) With Neural Network

	Trials	Success	Failures	Success Rate
Subject A	156	147	9	94.23 [%]
Subject B	146	130	16	89.04 [%]

(c) With Production Rule

	Trials	Success	Failures	Success Rate
Subject A	115	98	17	85.22 [%]
Subject B	102	84	18	82.35 [%]

手法 A の結果 x_i^A と手法 B の結果 x_i^B の差 $d_i = x_i^A - x_i^B$ に基づき検定を行う。結論の信頼度 95% (有意水準 0.05)、被験者数 2 としたとき、統計量 t が $t > 6.314$ となる場合、手法 A の性能が手法 B よりも高いことが示される。HMM (手法 A) と NN (手法 B) について統計量 t を計算すると $t = 65.428$ 、NN (手法 A) と Production Rule (手法 B) について統計量 t を計算すると $t = 6.767$ となるため、HMM の性能が最も高く、Production Rule の性能が最も低いことが確認される。

本実験ではどの手法でもある程度の意図推定を実現することができた。しかし、前章で説明したように Production Rule の性能が最も低く、また、各被験者のリードの特徴時系列データを学習することにより、リードのタイミングのずれや大きさのばらつきを考慮することが可能な HMM の性能が最も高い。今後、人間から得られる力以外の情報や環境情報を取り扱うことを考慮すると、HMM のような数多くのデータを時系列に基づいて取り扱える手法が有効になると考える。

5.2 協調運動実験

ロボットが、ステップ運動を能動的かつ人間と協調して実現することが可能であるかを確認するための実験を行った。まず、実験では、被験者 A, B のステップ運動をモーションキャプチャシステムにより計測し、各被験者の歩幅に合わせたスケーリングファクタ行列 A を決定した。ここで、通常の社交ダンスでは回転運動の大きさを変化させないため、回転運動については固

Fig. 14 Cooperative motion generation with step coefficient adapted to each subject

定した。被験者 B (身長 168 [cm]) の x 軸および y 軸方向の歩幅をそれぞれ 1, 1 としたとき、被験者 A (身長 184 [cm]) の x 軸および y 軸方向の歩幅はそれぞれ 1.33, 1.06 となった。

このように決定したスケーリングファクタ行列 A をロボットに与え、各被験者と社交ダンスを踊ったときの運動をモーションキャプチャシステムにより計測し、また、そのときの被験者・ロボット間の相互作用力を計測した。Fig. 14 (a) は被験者 A とロボットの運動軌道、Fig. 14 (c) は被験者 B とロボットの運動軌道である。ここで、図中の Human X, Human Y は被験者の軌道、Robot X, Robot Y は協調運動生成により修正されたロボットの軌道、Fixed A X, Fixed A Y は被験者 A の歩幅係数をロボットに与えたときのロボットの理想軌道、Fixed B X, Fixed B Y は被験者 B の歩幅係数をロボットに与えたときのロボットの理想軌道である。また、Fig. 14 (b) は被験者 A ・ロボット間の相互作用力、Fig. 14 (d) は被験者 B ・ロボット間の相互作用力である。Fig. 14 (b), (d) の 0 [s] から 0.5 [s] までは被験者の加えるリードにかかわる部分が確認でき、0.5 [s] 以降は相互作用力はほとんど生じないことが確認できる。Fig. 14 より、人間の歩幅の大きさに基づいてロボットの運動を生成することによって、ロボットが人間の運動に能動的に追従していることが確認できる。

次に、被験者の歩幅に合わない軌道をロボットに与えたときの被験者とロボットの運動、および相互作用力を計測した。Fig. 15 (a), (c) はそれぞれ被験者 B の歩幅係数をロボットに与えたときの被験者 A とロボットの運動軌道、被験者 A の歩幅係数をロボットに与えたときの被験者 B とロボットの運動軌道である。また Fig. 15 (b), (d) はそのとき計測された相互作用力である。Fig. 15 (b), (d) より、0.5 [s] 以降 (リードにかかわらない部分) において相互作用力の変動が大きいことが確認できる。また、Fig. 15 (a), (c) から確認できるように、被験者の歩幅に合わない軌道をロボットに与えた場合においても、ロ

Fig. 15 Cooperative motion generation with step coefficient unadapted to each subject

ットは被験者の歩幅に応じた軌道に追従していることが確認できる。これは被験者とロボットに与えた運動軌道にずれが生じたことにより、相互作用力が大きく変動し、ダンピング制御項 $\dot{x}_f$ によって運動修正が大きく行われたためである。

本実験では、モーションキャプチャシステムにより計測した人間の運動に基づいて歩幅を決定し、実験結果よりロボットが能動的に人間の運動に追従したことが確認できた。また、人間とロボットの運動にずれが生じる場合は、ダンピング制御項 $\dot{x}_f$ により、人間の運動に適応するようにロボットの運動が修正された。これらの結果より、能動的かつ人間の運動に適応したロボットの協調運動生成手法の有効性が確認された。

6. お わ り に

本論文では、力学的相互作用を伴う人間・ロボット間における能動的かつ適応的な協調運動を実現することを目的とし、その一例として社交ダンスを取り上げた。次に、社交ダンスを人間と踊るためのロボット MS DanceR を開発し、そのコントロールアーキテクチャ CAST を提案した。そして、CAST を MS DanceR に適用し、実験を行うことでその有効性を説明した。

今後の展望として、5.2 節で行ったようにあらかじめ歩幅の係数を決定するのではなく、リアルタイムに変化する歩幅においても、ロボットが人間の歩幅を推定し、能動的に人間の歩幅に適応する協調運動生成手法を開発する予定である。また、提案したアーキテクチャの枠組みで環境情報など多くの情報を取り扱うことで、人間だけでなく環境にも適応可能な協調運動システムを開発する予定である。

謝 辞 本研究の一部は、平成 15 年度日本学術振興会科学研究費補助金基礎研究 (A) (2) (15206049)、柏森情報科学振興財団研究助成金の援助を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- [1] H. Kazerooni: "Human/Robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals," Proc. of IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, pp.1632-1647, 1989.
- [2] O.M. Al-Jarrah and Y.F. Zheng: "Arm Manipulator Coordination for Load Sharing Using Variable Compliance Control," Proc. of IEEE Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.49-54, 1993.
- [3] Y. Hirata and K. Kosuge: "Distributed Robot Helpers Handling a Single Object in Cooperation with a Human," Proc. of IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, pp.458-463, 2000.
- [4] 前田雄介, 原崇之, 新井民夫: "躍度最小モデルを用いた動作予測に基づく人間-ロボット協調作業", 日本機械学会論文集, vol.68, no.675, C 編, pp.3367-3372, 2002.
- [5] 山田陽滋, 大東治宜, 酒井隆之, 梅谷陽二: "人間/ロボット共同搬送作業において作業者の意向を反映させるためのヒューマン・インタラクションの提案", 日本機械学会論文集, vol.67, no.656, C 編, pp.1069-1076, 2000.
- [6] M. Fujita and K. Kageyama: "An Open Architecture for Robot Entertainment," Proc. of the First Inter. Conf. on Autonomous Agents, pp.234-242, 1997.
- [7] T. Shibata: "Emergence of Emotional Behavior through Physical Interaction between Human and Robot," Proc. of the 1999 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, pp.2868-2873, 1999.
- [8] 田島年浩: "感情をもったペット型ロボット", 日本ロボット学会誌, vol.18, no.2, pp.188-189, 2000.
- [9] 真辺松雄: ダンスファン 12 月号増刊 ダンスがよく分かる本, 白夜書房, 1993.
- [10] 安居, 長橋, 高橋: ニューラルプログラム, 昭見堂, 1993.
- [11] L.R. Rabiner: "A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition," Proc. of IEEE, vol.77, no.2, pp.257-285, 1989.
- [12] S.M. Ross: Introductory Statistics (Second Edition). ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2005.

竹田貴博 (Takahiro Takeda)

1981 年 7 月 3 日生。2003 年東北大学工学部機械知能工学科退学。2005 年同大学大学院工学研究科バイオロボティクス専攻博士課程前期修了, 同年, 博士課程後期に進学。現在に至る。ダンスパートナロボットに関する研究に従事。2005 年日本機械学会三浦賞, 2005 年 IEEE RAS JAPAN Chapter

Young Award (IROS 2005) 受賞, IEEE の学生会員。

(日本ロボット学会学生会員)

平田泰久 (Yasuhisa Hirata)

1975 年 5 月 18 日生。1998 年東北大学工学部機械知能工学科卒業。2000 年同大学大学院工学研究科機械知能工学専攻修了。同年同大学大学院工学研究科助手。2002 年 11 月より科学技術振興機構さきがけ研究 21 "相互作用と賢さ" 領域研究員 (兼任)。2006 年 4 月より, 同大学大学院工学研究科助教授,

現在に至る。博士 (工学)。複数ロボットの協調, ロボットヘルパー, 歩行支援システム等の研究に従事。2001 年日本ロボット学会研究奨励賞, 2005 年日本機械学会賞 (論文), 日本ロボット学会論文賞, ファナック FA ロボット財団論文賞等受賞。IEEE, 日本機械学会等の会員。
(日本ロボット学会正会員)

林 智大 (Tomohiro Hayashi)

1979 年 5 月 15 日生。2002 年東北大学工学部機械知能工学科卒業。2004 年同大学大学院工学研究科機械知能工学専攻修了。同年, 日立製作所に入社。現在に至る。在学中はダンスパートナロボットに関する研究に従事。

小菅一弘 (Kazuhiro Kosuge)

1955 年 10 月 2 日生。1980 年 3 月東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年 4 月日本電装 (現:デンソー) 入社。1982 年 10 月東京工業大学工学部助手。1990 年 9 月名古屋大学工学部助教授を経て, 1995 年 3 月東北大学工学部教授, 1997 年東北大学大学院工学研究科教授 (大学院重点化による配置換え), 現在に至る。工学博士。ロボット, メカトロニクス, マシンシステム, 知能機械などの研究に従事。2002 年・2005 年日本機械学会賞 (論文), 2005 年日本ロボット学会論文賞等受賞。IEEE, 日本機械学会, 計測自動制御学会等の会員。IEEE Fellow, 日本機械学会フェロー, 計測自動制御学会フェロー。
(日本ロボット学会正会員)