作業性と人間追従性を両立する動作制御手法

岩田 浩 康^{*1*3} 星野 勇 人^{*2} 森田 寿 郎^{*3} 菅野 重 樹^{*3}

Coordination Control Strategy for Task Performance and Following Motion to Human

Hiroyasu Iwata^{*1*3}, Hayato Hoshino^{*2}, Toshio Morita^{*3} and Shigeki Sugano^{*3}

This paper proposes a flexible adapting system for human symbiotic robots that stably performs given tasks as preplanned even if physical contacts and interferences with humans occur during movement. In order to accomplish tasks stably while compliantly adapting to human motion keeping contacts, task constraints state transition and four types of motion phases (Preset motion, Human following motion, Task continuing motion, Posture recovering motion) which are switched according to contact situations are incorporated in this system. As a result of evaluation experiments, it was confirmed that the proposed system is effective for human-robot coordination to realize both high task performance and adaptability to humans.

Key Words: Human Symbiotic Robots, Physical Contact and Interference, Coordinated Control, Compliant Motion, Stable Task Performance

1. は じ め に

人間共存ロボット [1][2] が人間のすぐ傍らで作業支援する場面では、人間との不測の接触・衝突や意図的な触れあい（本研究では、包括して‘触触’と呼ぶ [3]）が起こる。このときロボットには、既定通りに作業を遂行するのではなく、人間からの力や動きに合わせて、作業動作形態を調整・変化させながら、結果として当初の目標作業を完遂する適応能力が必要である。すなわち、作業性と人間追従性の両立技術が不可欠となる。人間追従性とは、直接教示における操作性や人間の動作意図への従順性、人間に対する安全性などと密接に関連しており、人間共存ロボットの重要な基本機能の一つである。

これまで、作業性については、主に産業用ロボットの分野で研究されており、例えば、作業の汎用性や効率性、正確性を重視した動作制御手法やソフトウェアアーキテクチャの報告がなされている [4]~[6]。また、人間（環境）との接触・衝突に関する研究では、①人間との活動空間の分離やフェイルセーフ [7][8]、②衝突事前回避 [9][10]、③安全設計対策の定量評価法 [11] や衝撃吸収カバーと運動制御の併用 [12]、腰部関節による受動的衝突力緩和 [13] など様々な方法が提案されている。しかしこれらの研究では、触触発生時の作業性と安全性の問題が分離して扱

われており、また、触覚センサを用いて様々な触触状況を検出し動作制御する研究はほとんど行われていない。

以上の動向を踏まえ、本研究では、触覚に基づき人間との触触を計測・制御する立場から、人間共存ロボットに不可欠な作業性と人間追従性を両立可能な動作制御手法を構築することを目的とする。

提案する手法は、触触発生時に既定の動作から人間に追従する動作に移行する機能を備え、またこれに加えて、作業性を喪失してはならない触触発生場面では作業内容の差異に応じて適切な動作形態で対応する機能、さらには堅牢な目標作業遂行のために触触解消後に動作を修正する機能など、人間共存ロボットの触触時における動作制御に不可欠な機能を内包している。

本論文では、まず作業完遂性と人間追従性を両立する動作制御手法が満たすべき要求機能を検討する。次に、任意の触触発生場面でそれらを両立させた上で、その後の目標作業遂行を可能とする動作制御アーキテクチャを示す。また、触触時に作業性と人間追従性を両立するために必要な作業内容の定量化記述方法について述べる。最後に、提案する動作制御手法を等身大人間形ロボットシステムに実装し、人間との触触実験によりその有用性を示す。

なお、本論文では、「作業」を、同一の作業ルールを有する連続事象であり、目標作業を構成する要素（タスク）と定める。作業ルールとは、作業性を喪失しないための作業固有の規則（例えば、コーヒーをこぼしてはならないなど）であり、これは作業内容に応じて異なってくる。すなわち、ロボットの目標作業を、作業ルールの属性が異なる作業の連続体として扱う。

原稿受付 2002 年 3 月 11 日

^{*1}早稲田大学大学院理工学研究科

^{*2}キャノン株式会社

^{*3}早稲田大学理工学部

^{*1}Graduate School of Science and Engineering, Waseda University

^{*2}Canon Inc.

^{*3}School of Science and Engineering, Waseda University

2. 両立手法の機能的要求

作業性と人間追従性を両立する動作制御手法（以下、両立手法と呼ぶ）が満たすべき要求機能を下記の三つの観点から検討した。

2.1 基本機能

まず、基本機能を以下に示す。

- (a) 既定動作実行機能：既定通りの作業動作の実行
- (b) 人間追従機能：人間の動きや力の従順な受け流し
- (c) 作業持続機能：作業ルールを満たす人間追従・作業持続
- (d) 動作修正機能：目標作業達成のための動作修正

舐触未発生時には、作業ルールを把握した上で既定の動作を遂行する。いったん舐触が生じると、基本的に人間の動きに追従する動作に移行する。このとき、作業性を喪失してはならない作業遂行中の場合には、人間に追従しつつ作業ルールを満たす動作に移行する。舐触解消後には、舐触への適応で生じた変化を動作補完し、堅牢な目標作業の遂行を目指す。

2.2 アーキテクチャ

次に、前節で概説した要求機能を満足する動作制御アーキテクチャを設計するに当たり、下記の課題について検討した。

- (1) 各基本機能と連続性／離散性の関係
- (2) 各機能と時間依存性／時間非依存性の関係

上述した四つの機能は、それ単体では連続事象として扱えるが、大局的には、舐触の発生・解消に伴い、互いに離散的に現れる。

既定動作実行機能や動作修正機能は、体姿勢状態など目標状況が既知であるため、例えば連続軌道の追値で達成される。このとき、追値軌道は、時間依存 [4] あるいは時間非依存 (Event Driven) [14] のどちらで計画してもよい。一方、人間追従機能や作業持続機能は、時間非依存性を有する必要がある。その理由として、(i) 舐触の発生・解消の時間的予測が困難、(ii) 人間からの作用力の大きさや方向の時間的予測が困難であることが挙げられる。

以上より、両立手法の動作制御アーキテクチャの仕様として、時間特性の異なる各連続事象を実時間に制御できるとともに、連続事象の構成要素を実時間で離散的に扱える構造を有する必要がある。これらの特徴は、従来の離散事象を扱った作業動作制御手法 [15] などでは考慮されていなかった。

2.3 作業内容に応じた舐触適応

ここでは、作業内容と舐触への適応形態の関係について考察し、両立手法の設計指針とする。

Fig. 1 のように、空のコップを運搬しているとき (**Fig. 1 (a)**) と中身の入ったコップを運搬しているとき (**Fig. 1 (c)**)、さらにはコップに注いでいるとき (**Fig. 1 (d)**) の舐触への適応方法は、作業ルールの属性に差異があるため、互いに異なってくる。

Fig. 1 (a) のような作業ルール非設定状況下の舐触に対しては、全身の柔軟性を用いて、人間の動きや力を従順に受け流すことが必要である。一方で作業ルール設定状況下にある場合には、力追従だけでは不十分となる。

例えば、コーヒーを運ぶロボットが舐触に対して人間の動きに追従するだけでは、作業を完遂できないどころか、周囲の人

Fig. 1 Coordinated motions for task performance and human following, according to the diversity of task attributes

Fig. 2 Coordination control architecture

間にこぼれた熱湯で火傷を負わせるなど二次的な災害を生じるおそれがある (**Fig. 1 (b)**)。

このような場合、例えば **Fig. 1 (c)** のように、力追従しつつコップの中身をこぼさないように腕を前方（上方）に動作させる必要がある。ところが、**Fig. 1 (d)** のようにコーヒーを注いでいる場合には、前方への動作はできず、冗長性を利用して手先位置・姿勢を保持しつつ力追従するように腕を動作させなければならない。これは、作業内容に応じて利用可能関節や動作可能方向が異なるため、同じ動作プランニングを適用できないことを意味する。

以上より、両立手法では、作業ルールの属性に合わせて作業性を喪失せずに人間追従するための方策（舐触適応方策）を備えておく必要がある。

3. 両立アーキテクチャ

ここでは、前章に示した機能的要求を満たす動作制御アーキテクチャの設計方法について述べる。全体設計と要素設計に分けて概説する。

3.1 全体設計

導出した要求機能を満たすための処理フローを **Fig. 2** に示す。2.1 節で述べたおのおのの基本機能に対応するロボットの動作フェーズを既定動作、追従動作、持続動作、修正動作と呼ぶ。四つの動作フェーズは互いに離散的な結合関係にあるため、時間非依存型ベトリネットである正規のプレース／トランジションネットを用いることで、**Fig. 3** のように各遷移関係を図示で

Fig. 3 Motion phase transition connection using Place/ Transition Net

きる。ここで、動作フェーズはプレース p_i に、遷移条件はトランジション t_i に対応する。唯一のトークンが存在するプレースは、生起中の動作フェーズを表す。修正動作が生起状態のとき、トランジション t_1 と t_2 はともに発火可能となるが、条件が成立したプレースが一つ選択される。

仮想的にプレース間の遷移重みをすべてゼロに設定すると、システムは触覚に対して不感となり、これは従来までの産業用ロボット制御システムに相当する。そのため、提案するアーキテクチャは従来の動作制御手法を内包し、かつ人間との触覚に適切に対処する適応性を兼ね備えた拡張システムと位置づけられる。

プレース間の遷移は離散的に起こるが、プレース内では連続事象を扱える。このことから、本設計により、2.2 節で述べた要求機能のうち、連続事象の構成要素を実時間で離散的に扱えることとなる。

次に、作業持続構造について述べる。触覚の発生が考慮されていない従来の動作制御手法では、一般的に作業遂行のために追値すべき軌道のみを既定していた [4][14]。しかしこれでは、ロボットが触覚適応方策を持つには至らないため、時変かつ予期不能な触覚発生場面において、作業ルールの属性に適切な動作で巧みに対処することが難しかった。この問題に対し本研究では、追値すべき軌道の遷移に加え、作業性を喪失しないための作業ルールの遷移を並列的にロボットに与える構造を提案する。この点は、作業性と人間追従性を両立する上で、重要なポイントの一つである。以下に詳細を示す。

作業は、任意の体姿勢状態を表すノードと、それらを結合・補完する動作状態を表すアークで構成できる [16]。目標作業の決定により通過ノードが選択され、ノード・アーク空間での Path の生成および実空間内での追値軌道のプランニングが行われる。

本アーキテクチャでは触覚の発生を前提としているため、ノードに関して、事前に設定されるプリセットノード (Preset Node) と、触覚適応後に新たに動的に生成されるインタラクティブノード (Interacted Node) の 2 種類を考える。インタラクティブノードは Fig. 3 において条件 t_3 の成立後に生成される。

各ノードとアーク、そして動作フェーズとの関係を Fig. 4 に示す。触覚はアークで生じ得ると考え、各アークには作業ルールを設定しておく。触覚未発生の際は、既定軌道の追値のみが有効となり、作業ルールは現出しない。しかし、いったん触覚が生じると、当該アークの作業ルールが動作規範として有効となり、作業の属性に適切な持続動作が生成可能となる。

3.2 要素設計

上述した全体設計を踏まえた上で、下記のように各動作フェー

Fig. 4 Relationship among nodes, arches and motion phases

ズの機能設計を行う。

(a) 既定動作

触覚が生じない限り、ロボットは作業ルールを把握した上で、既定通りに動作し作業を遂行する。具体的には、連続した二つのプリセットノード (起点ノード、目標ノード) の補間軌道を生成し、シーケンス通りにプリセットノードとアークを順に再現する。システムは全身触覚センサ [17] を用いて、既定動作中の触覚発生を常時監視する。触覚発生に伴い Fig. 3 の条件 t_1 の成立後に既定動作は中断され、後述の修正動作に備えて目標ノード情報をラッチする。

(b) 追従動作

アークに作業ルールが存在しない状況下で触覚の発生を検出すると、人間からの力を従順に受け流す動作が現出される。ロボットは、全身の関節の一部あるいは全体を用いて、加わる力の大きさと方向に順応した動作で対応する。触覚解消後、インタラクティブノードの生成とともにこの動作は終了する。

(c) 持続動作

作業ルールがアークに存在する状況下で触覚が発生した場合、追従動作だけでは作業喪失に伴う二次的な災害発生の危険があるため不十分となる。そこで、人間からの力や動きに柔軟に合わせつつ作業ルールを損なわない身のこなし、すなわち持続動作で対応する。このとき、可能な限り、加わる力の大きさと方向に順応するために、作業ルールの属性に適切な動作形態で作業持続する必要がある。触覚解消後、インタラクティブノードの生成とともにこの動作は終了する。

(d) 修正動作

追従動作や持続動作などの触覚適応により、ロボットの体姿勢は変化するため、当初の目標作業はこのままでは実現されない。そこで、触覚解消に伴い Fig. 3 の条件 t_3 の成立後、インタラクティブノードとラッチ済みの目標ノードを補間する。触覚が発生したアークに作業ルールが存在していた場合には、それを満たす動作形態で体姿勢の修正を行う。システムは既定動作遂行時と同様に、修正動作中の触覚の再発を常時監視する。

追従動作と持続動作では、時変かつ予期不能な力変化に対応するため、時間に非依存な制御系を設計する。一方、既定動作と修正動作に関しては、時間依存あるいは時間非依存に設定可能である。これらの時間特性は最終的に、動作制御則の構成の仕方により決定できる。

以上の要素設計により、2.2 節で述べた要求機能のうち、各動作フェーズを適切な時間特性で実時間制御できる枠組みが与えられる。

Table 1 Task attribute analysis based on task constraint conditions

Constraint Conditions	Wiping a plane of glass	Carrying a cup of tea	Gripping a shift lever	Pouring tea into a cup	Gripping a fixed bar	Steering a wheel (by hands)
Form	force	orientation (acceleration)	position	position and orientation	position and orientation	position and orientation (relative distance)
Part of Body	grip	hand	grip	grip/ hand	grip/ hand	grip/ hand
Basal coordinate system	arm	arm	arm or waist	arm	waist	waist
Degree	1	2(5)	3	4(5)	5	6(9)
Axis	Z	X, Y, ($\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$)	X, Y, Z	(ϕ, ψ) X, Y, Z	ϕ, ψ , X, Y, Z	θ, ϕ, ψ , X, Y, Z
Constrained factor	target force	the line normal to the tea surface (acceleration of the hand)	point on the lever	orientations of the hand and points of the spout	points on the bar axis	points on the circumference
Factor on tolerant level	below break force	posture (acceleration) not to pour	position of the lever	posture not to pour and plane over the cup	axis of the bar	circumference of the wheel
Strength	translation(Z axis): great, others: less	rotation: great translation: less	rotation: less translation: great	great	axially: less others: great	great
Number	1	1	1	1	1	1(2)

4. 人間追従と作業持続機能の具現化

ここでは、2.3 節に示した設計指針に基づき、人間追従性との両立を図りやすく、かつ作業内容に適切な動作形態で作業持続を実現するための作業ルール定量化記述方法と、それに基づく触適応方策の設計について述べる。

4.1 作業ルールの定量化

まず、作業ルールとして、作業内容の本質的属性を定量的に表す作業拘束条件を考える。作業拘束条件は、拘束形態、拘束部位、拘束座標系、拘束度、拘束軸、拘束値、許容拘束値、拘束強さ、拘束数から構成される。作業に応じて各要素を設定することで、作業持続のために動作が規定される関節や自由度数、動作範囲などを明確化できる。詳細を以下に示す。

拘束形態…位置、姿勢、力、(角)速度、(角)加速度

拘束部位…肩、上腕、肘、前腕、手首、手先、背中など体の任意の部位

拘束座標系…腕部根元や腰部根元など、拘束を受ける基準点に設定される座標系

拘束度…同一拘束部位に課された拘束の保持に必要な自由度数

拘束軸…拘束座標系において拘束を受ける軸(最大で並進・回転の六つ)

拘束値…位置や姿勢では座標、(角)速度や(角)加速度ではそれらを微分したもの、力では作用力

許容拘束値…作業性を喪失しないための拘束値許容限界

拘束強さ…拘束部位に定めるインピーダンス、すなわち慣性、粘性、剛性値

拘束数…異なる部位で同時に拘束を受ける数

これらの作業拘束条件を用いて、様々な作業を分析した。結果を Table 1 にまとめて例示する。拘束軸に関して、各軸(X, Y, Z) 周りの回転拘束の場合は(θ, ϕ, ψ)と表す。

なお、あらゆる作業について Table 1 のような拘束条件をあらかじめ設定することは、ロボット制御の点から現実的ではなく、何らかの一般化が必要であると考えられる。しかし、人間とロボットとの協調作業は極めて多様であり、現時点では、拘束条件の構成の妥当性を議論する段階であると位置付け、一般化は今後の課題とする。

4.2 触適応方策

次に、上述した作業拘束条件を満たしつつ人間から加わる力の大きさや方向に可能な限り順応するための触適応方策について述べる。触適応方策は、具体的には制御則で与えられる。このとき、拘束座標系や拘束度、拘束数の設定状況や、触状況に応じて変わる触部位などを考慮した上で、それらに影響される駆動可能関節に応じた制御則の導出を行う。次節に具体例を示す。

アークの系列だけに着目すると、目標作業は等価的に触適応方策の遷移で表される。作業設定状況下において触が発生した場合には、当該アークの作業拘束条件に適切な触適応方策が適用され、作業ルールを満たす持続動作あるいは修正動作が実現可能となる。

4.3 動作制御実験による検証

4.3.1 作業拘束条件に基づく触適応方策の設計

Table 1 に例示した「お茶運び」や「お茶注ぎ」などをとり上げ、作業ルール定量化記述に基づく触適応方策の設計例を示す。なお、「お茶運び」のように姿勢のみを拘束される状態を、以下では拘束形態に基づき「姿勢拘束」と呼ぶ。同様に、「車のシフトチェンジ」のように位置のみを拘束される状態を「位置拘束」、「お茶注ぎ」のように位置と姿勢の両方を拘束される状態を「位置・姿勢拘束」、作業が課されていない状態を「未拘束」と呼ぶ。

Fig. 5 に示したボトルからコップへのお茶注ぎ作業の場合、お茶の入ったボトルを運ぶアーク(Arc II)と空のボトルを運ぶアーク(Arc IV)では、たとえば体姿勢や追値軌道が同じであってもお茶の存在の有無という要因により作業の属性は異なる。そのため、Arc II では中身をこぼさないための姿勢拘束が、Arc IV (Arc I) では未拘束がそれぞれ設定される。一方、Arc III では注ぎ口の位置とボトルの傾け方を制御するために位置・姿勢拘束が設定される。作業拘束条件の他の各要素は、Table 1 に示した列情報となる。

触適応方策に関しては、Arc II では手先姿勢を保持しつつ人間の動きに追従する動作による対応(Fig. 1(c))、Arc IV (Arc I) では単なる追従動作による対応(Fig. 1(a))、Arc III では冗長性を利用して人間の動きに追従しつつ注ぎ口の位置とボトルの姿勢を同時に制御する対応(Fig. 1(d))を実現可能な

Fig. 5 Transition of nodes and arches in a task

制御則をそれぞれ構成する。

拘束座標系は腕部根元，許容拘束値は拘束値と同値，拘束強さは各値とも無限大，接触部位は右上腕部と設定した。本論文では，一般的な7自由度アームを対象とし，以下のように制御則を設定した[18]。

(i) 人間追従動作基本制御則

未拘束と姿勢拘束に共通する人間追従動作制御則には，一般的な力制御手法[19][20]を参考に，接触部位で高いモビリティを実現可能なモビリティ制御則を適用する(式(1))。この制御則に基づき，接触部位から根元側の関節では式(2)を用いて力を受け流す。 $\mathbf{D}_0^{-1}$ は，接触部位 $\mathbf{x}$ におけるモビリティを表し， $\mathbf{D}^{-1}$ は関節モビリティで対角行列， $\mathbf{J}_c^T$ は接触部位へのヤコビアン， $\mathbf{F}$ は接触部位に加わる力， $\dot{\mathbf{q}}$ は関節速度をそれぞれ表す。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{D}_0^{-1} \mathbf{F} \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{J}_c^T \mathbf{F} \quad (2)$$

(ii) 姿勢持続

Fig. 6(a)に示すような姿勢拘束の場合，人間追従には式(2)を適用し，かつ式(3)を満たすように手先姿勢を調整する制御則を追加すればよい。 ${}^a\mathbf{O}_{\text{hand}}$ は腕部根元座標系標記の目標手先姿勢方向ベクトルを， ${}^h\mathbf{O}_{\text{hand}}$ は手先座標系標記の現姿勢ベクトルを表す。 ${}^a\mathbf{R}_3$ は腕部根元座標系から肘関節座標系への回転行列を， ${}^3\mathbf{R}_h$ は肘関節座標系から手先座標系への回転行列を表す。

$${}^a\mathbf{R}_3 \cdot {}^3\mathbf{R}_h \cdot {}^h\mathbf{O}_{\text{hand}} = {}^a\mathbf{O}_{\text{hand}} \quad (3)$$

(iii) 位置持続

位置拘束が必要な作業では動作可能範囲が限定されるため，式(1)をそのまま適用することはできない。Fig. 6(b)に示すように，力追従方向ベクトルを式(1)の並進系から冗長軸周りの回転系に変換する必要がある。ここでは，式(4)に示す回転系のモビリティ制御則を適用する。これは，アームが手首から一定距離平面上にある肘旋回円軌道上を力に応じた角速度 θ' で回転動作することによって，手首位置拘束を満たしつつ力を

Fig. 6 Diversity of forms of task continuing motion

受け流せることを表している。 $\mathbf{D}_r^{-1}$ は冗長軸周りの回転モビリティを表し， $\|\mathbf{r}\|$ は肘旋回円半径のノルム， θ' は冗長軸周りの角速度をそれぞれ表す。

$$\theta' = \frac{\mathbf{D}_r^{-1} \mathbf{F}}{\|\mathbf{r}\|} \quad (4)$$

以上より，本章で提案する手法は，特定の作業だけでなく，様々な作業に対して一般的かつ容易に適用可能である。

4.3.2 異なる作業設定下における接触適応実験

本章で提案する作業拘束条件と接触適応方策の有効性を確認するため，4種の作業状況を設定し，等身大人間形ロボットWENDY[21]と人間との接触適応実験を行った。WENDYの体表面には，正確な作用力ベクトルの検出を可能とする双腕カバーセンサ[17]を装着した。実時間接触検出に基づく柔軟な動作制御を実現するために，1[ms]単位で体表面への作用力ベクトル検出が可能な計測部(PC-98/Celeron 500[MHz])と腕部動作制御部(PC-98/Pentium 200[MHz])，および体姿勢や作業拘束条件などのモニタリングと動作フェーズの移行管理を行う統括部(PC-AT/Pentium III 600[MHz])を構築し，それぞれを共有メモリで結合するシステムを構成した。

ここでは，以下の4種の連続事象を個別に検証する。

(a) 未拘束(空コップ運びなど: Arc I, Arc IV)

拘束度は0となる。式(2)に基づき追従動作を行う。

(b) 姿勢拘束(お茶運びなど: Arc II)

手先姿勢拘束を与える。拘束度は2，拘束軸は θ ， ϕ となる。式(2)，(3)に基づき，持続動作(人間追従・手先姿勢保持)を行う。手先の人間形ハンドには中身の入ったコップを持たせる。拘束値に関しては，目標姿勢ベクトルを鉛直上向きに設定し， ${}^a\mathbf{O}_{\text{hand}} = (0, 0, 1)^T$ ， ${}^h\mathbf{O}_{\text{hand}} = (0, 1, 0)^T$ とした。

(c) 位置拘束(車のシフトチェンジなど)

手首位置拘束を与える。拘束度は3，拘束軸はX，Y，Zとなる。到達可能範囲内の任意の点を拘束値，すなわち目標固定位置とした。目標位置保持のために，式(4)に基づき冗長性を利用した持続動作(人間追従・手首位置保持)を行う。

(d) 位置・姿勢拘束(お茶注ぎなど: Arc III)

(b)，(c)の拘束を合わせ，計5自由度拘束を与える。式(3)，(4)に基づき持続動作(人間追従および手首位置・姿勢保持)を行う。手先には中身の入ったコップを持たせる。

実験結果をそれぞれFig. 7~10に示す。また，検出力(絶対

Fig. 7 No constraints

Fig. 8 Orientation constraint

Fig. 9 Position constraint

Fig. 10 Position-Orientation constraints

値)と手先姿勢、手首位置変化量(絶対値)の遷移を Fig. 11～14 に示す。Fig. 7 では、人間の動きや力に合わせて柔軟に追従することが可能であるが、未拘束が設定されているため、手首の位置・姿勢ともに大きく変化しているのが分かる。このときの手首位置変化は、Fig. 11 に示すように、最大 300 [mm] を超えている。また、手先姿勢変化は、Fig. 12 に示すように、最大 30 [deg] を超える。一方で、Fig. 8 では、人間に追従しつつコップの中身をこぼさないように動作しているのが分かる。Fig. 9 では、手首のボールの中心位置だけがずれないように冗長性を利用し柔軟に動作しているのが分かる。そして Fig. 10 では、手首位置および姿勢ともに目標値を保持しつつ柔軟な動作が可能であることが分かる。

接触発生時間帯における未拘束時と作業持続時の双方の各平均変化量(絶対値)を Table 2 にまとめる。手首位置拘束下 (Fig. 13) では、未拘束時と比べ、追従しつつもわずかな位置変化に収まっていることが分かる。また、手先姿勢拘束下 (Fig. 14) においても、同様にして持続動作が有効に働き、わずかな姿勢変化に収まっていることが確認できる。

実験の結果、作業拘束条件に基づく接触適応方策を用いることにより、当該作業ルールに適切な動作形態で追従動作および

Fig. 11 Position change under no task constraints

Fig. 12 Orientation change under no task constraints

Fig. 13 Position change under position constrained

Fig. 14 Orientation change under orientation constrained

Table 2 Changes in position and orientation

Figure	Constraint form	Evaluating factor	Variation(average)
Fig.11	None	Grip position [mm]	118
Fig.13	Position	Grip position [mm]	1.8
Fig.12	None	Orientation error in ZX plane [deg]	30.7
		ZY plane [deg]	15.8
Fig.14	Orientation	ZX plane [deg]	2.6
		ZY plane [deg]	2.9

持続動作が生成可能であることが示された。

5. 評価実験

本論文で提案する両立手法の有用性を検証するため、連続した異なる作業ルール設定下における等身大人間形ロボットと人間との接触実験を行った。本実験では、3章で提案した動作制御アーキテクチャを用いることで、前章で有用性が確認された個別の連続現象を実時間で離散的に扱えるかどうかを検証することを目的とし、既定動作中に任意の場面で生じる接触に対して、適切な動作フェーズに移行しつつ堅牢な目標作業完遂が可能かどうかを評価する。

Fig. 15 Monitoring of body posture, task states and motion phases

Fig. 16 Transition of motion phases and task constraints, and detected force

なお、既定動作や修正動作に関しては、PTP方式の時間軌道で二つのノードを補間するとともに、線形PDフィードバック制御則 [4] を主に適用した。

目標作業として、机上のコップを掴み、持ち上げ、異なる場所に置き換える状況を想定し、これを四つのプリセットノード、Node α : 基準姿勢、Node β : コップをつかむ、Node γ : 別の場所にコップを置く、Node δ : 待機姿勢で構成した。実機のリック構成を再現したCG (Fig. 15 (右)) を用いて体姿勢操作を行い、プリセットノードと遷移時間、アーク、作業拘束条件の設定を行った。作業拘束条件として、コップを持ち上げ異なる場所へ移動するアーク (Arc β) には姿勢拘束を、それ以外には未拘束を設定した。各作業拘束条件と触覚適応方策の詳細は、4.3.2 項 (b) と同様とした。本実験では、Fig. 3 のトランジションの遷移条件を下記のように設定した。

t_1 : 検出力が設定値を超える

t_2 : 目標ノードとの各関節角度偏差が設定値を下回る

t_3 : 検出力と関節角速度ノルムが共に設定値を下回る

触覚実験中の実機 WENDY の様子を Fig. 15 (左) に、実機と同期して内部状態 (体姿勢・拘束形態・動作フェーズ) を CG でモニタリングした様子を同図右に示す。

拘束形態および動作フェーズの遷移と触覚発生中に生じた外力波形の関係を Fig. 16 に示す。拘束形態は番号で識別し、0~3 までを未拘束、姿勢拘束、位置拘束、位置・姿勢拘束にそれぞれ対応させる。また、各拘束下における動作フェーズは、Table 3 に示す番号で識別する。

各遷移段階の拘束形態と動作フェーズ、遷移条件の関係をまとめて Table 4 に示す。インタラクティブノードは、条件 t_3 が成立する度に自動生成されている。

実験結果から、以下のことが確認できる。なお、括弧内の記

Table 3 Number correspondences to motion phases under task constraints

Constraint form \ Motion phase	Preset Motion	Human Following Motion* / Task Continuing Motion	Posture Recovering Motion
No Constraint	[0]	[1]*	[5]
Orientation Constraint	[0]	[2]	[6]
Position Constraint	[0]	[3]	[7]
Position and Orientation Constraint	[0]	[4]	[8]

Table 4 Transitions of states

Time [s]	Constraint form	Motion phase	Condition
a) 5	Orientation	Task Continuing Motion (Orientation maintained)	t_1
b) 8	Orientation	Posture Recovering Motion (Orientation maintained)	t_3
c) 10	Orientation	Task Continuing Motion (Orientation maintained)	t_1
d) 12	Orientation	Posture Recovering Motion (Orientation maintained)	t_3
e) 14	Orientation	Preset Motion	t_2
f) 16	None	Human Following Motion	t_1
g) 19	None	Posture Recovering Motion (No constraint)	t_3
h) 20	None	Human Following Motion	t_1
i) 22	None	Posture Recovering Motion (No constraint)	t_3
j) 25	None	Preset Motion	t_2

号は Table 4 の各事象に対応するものとする。

作業ルールを把握した上で能動的に既定作業動作を遂行できること (e, j), 既定・修正動作中にかかわらず、触覚検出時には、人間の動きや力を柔軟に受け流せること (f, h), 作業拘束条件を満たす範囲内で人間に追従しつつ作業を持続できること (a, c), 触覚解消後には目標作業達成のために、必要があれば作業拘束条件を満たしつつ、体姿勢の修正を行い作業に復帰できること (b, d, g, i)。

また、表中の a~e は、Node β , γ の間の Arc β を、f~j は、Node γ , δ 間の Arc γ を遷移中であることを表す。触覚未発生の際に Node α , β を通過した後、触覚発生に伴い追従や持続、修正動作を経て、e や j の既定動作状態に復帰し、条件 t_2 の成立後にプリセットノード Node γ , δ を通過したことが分かる。このことから、触覚適応と目標作業遂行がともに実現できていることが示された。

本実験の結果、提案する両立手法は、複数の連続事象を実時間、かつ離散的に遷移させることが可能であることが確認され、2 章で述べた機能的要求をすべて満たすことが示された。

6. ま と め

本論文では、触覚に基づき、人間との不測の接触・衝突や意図的な触れあい (触覚と呼ぶ) を計測・制御する立場から、人間共存ロボットに不可欠な作業性と人間追従性を両立する動作制御手法を提案した。

まず、触覚発生時に作業の属性を踏まえた上で作業性を喪失せず人間追従を実現するために、目標作業設定時において、追値すべき軌道の遷移に加え、作業性を喪失しないための作業ルールの遷移を並列的にロボットに与える構造を提案した。次に、作業ルールとして、作業の本質的属性を定量的に表す作業拘束条件を考え、これに基づき作業持続と人間追従の両立が可能な触覚適応方策を設計・適用する方法について述べた。提案する両立手法を等身大人間形ロボットに実装し、「お茶注ぎ」や「お茶運び」など異なる作業場面を想定した人間との触覚実験を行った。評価項目として、人間追従時の姿勢や位置の変化量の比較

や、動作形態の移行状況と作業状況との対応の適確さに着目して評価した結果、接触発生場面において、ロボットが作業内容に応じて適切な作業持続形態で人間の動きや力に柔軟に追従しつつ目標作業を遂行可能であることが示された。

以上より、本論文で提案する作業性・人間追従性両立動作制御手法は、人間・ロボット共存系において不可避な接触発生時に、ロボットが人間に柔軟に適応しつつ当初の目標作業を堅牢に遂行する上で有用であることが確認された。今後は、本手法を全身協調運動に拡張するとともに、定量的な作業拘束条件の一般化を目指したい。

謝 辞 本研究の一部は、平成 12 年度文部省科学研究費補助金基盤研究 (B) (No. 11450105) および、早稲田大学ヒューマノイド研究所、コンソーシアムの援助の下で行われました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] 人間共存型ロボット研究専門委員会：“人間共存型ロボットシステムにおける技術課題”，日本ロボット学会誌，vol.16，no.3，pp.288-294，1998。
- [2] 早稲田大学ヒューマノイドプロジェクト編，橋本周司，高西淳夫，菅野重樹，成田誠之助，小林哲則，高信英明著：人間型ロボットの話，pp.100-106，日刊工業新聞社，1999。
- [3] 岩田浩康，星野勇人，森田寿郎，蔭梁中，菅野重樹：“人間共存ロボットの接触適応行動～第 6 報：作業性と安全性を両立可能な接触適応動作制御～”，第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.461-462，2000。
- [4] 有本卓：“ロボット制御系の設計”，日本ロボット学会誌，vol.4，no.4，pp.401-409，1986。
- [5] 久保田一成：“ロボット作業の成分特徴モデル”，日本ロボット学会誌，vol.10，no.6，pp.817-827，1992。
- [6] 上地正昭，小方博之，中村幸博，水川真：“コンポーネントアーキテクチャを適用したロボット作業教示システム”，日本ロボット学会誌，vol.19，no.2，pp.189-196，2001。
- [7] 杉本旭：“ロボットにおける安全技術とインテリジェント・フェイルセーフ”，日本ロボット学会誌，vol.2，no.2，pp.158-163，1984。
- [8] 山田陽滋，平澤康弘，津坂祐司，黄声揚，梅谷陽二：“安全部分空間の構築とその有効性の検討”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集，paper 7P6-203，1997。
- [9] O. Khatib: “Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots,” Int. J. of Robotics Research, vol.5, no.1, pp.90-98, 1986。
- [10] V.J. Lumelsky and E. Cheung: “Real-Time Collision Avoidance in Teleoperated Whole-Sensitive Robot Arm Manipulators,” IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol.23, no.1, pp.194-203, 1993。
- [11] 生田幸士，野方誠：“福祉ロボットの安全性に関する統一的評価法の提案—危険性の定量化による安全設計対策の評価—”，日本ロボット学会誌，vol.17，no.3，pp.363-370，1999。
- [12] 森田寿郎，鈴木雄一郎，川崎毅彦，菅野重樹：“人間共存ロボットマニピュレータのための衝突安全設計と制御”，日本ロボット学会誌，vol.16，no.1，pp.102-109，1998。
- [13] H. Lim and K. Tanie: “Collision-Tolerant Control of Human-Friendly Robot with Viscoelastic Trunk,” IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.4, no.4, pp.417-427, 1999。
- [14] T.J. Tarn, N. Xi and A.K. Bejczy: “Motion Planning in Phase Space for Intelligent Robot Arm Control,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, vol.2, pp.1507-1514, 1992。
- [15] M. Song, T.J. Tarn and N. Xi: “Integrated Hybrid System for Planning and Control of Concurrent Tasks in Manufacturing Systems,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.2, pp.1192-1197, 1998。
- [16] T. Morita, K. Shibuya and S. Sugano: “Design and Control of Mobile Manipulation System for Human Symbiotic Humanoid: Hadaly-2,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.2, pp.1315-1320, 1998。
- [17] 岩田浩康，星野勇人，森田寿郎，菅野重樹：“人間共存ロボットのための全身触覚インタフェース”，日本ロボット学会誌，vol.20，no.5，pp.543-549，2002。
- [18] H. Iwata, H. Hoshino, T. Morita and S. Sugano: “Human-Humanoid Physical Interaction Realizing Force Following and Task Fulfillment,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, vol.1, pp.522-527, 2000。
- [19] N. Hogan: “Impedance Control: An Approach to Manipulation, Part I-III,” ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.107, pp.1-24, 1985。
- [20] J.K. Salisbury: “Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates,” Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control, pp.95-100, 1980。
- [21] H. Iwata, S. Kayaba, T. Morita and S. Sugano: “Design of Humanoid Surface Sensor for Tactile Interference with Human,” Proc. of IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication, vol.2, pp.549-554, 1998。

岩田浩康 (Hiroyasu Iwata)

1974 年 8 月 16 日生。1997 年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。1999 年同大学大学院修士課程修了。現在同大学大学院博士後期課程在籍。2001 年より同大学理工学部助手。人間共存型ヒューマノイドロボットに興味を持つ。人間との物理的な触れあいに対して作業性と人間追従性を両立する人間適応能力の開発研究に従事。日本機械学会，IEEE などの会員。2001 年日本ロボット学会研究奨励賞受賞。（日本ロボット学会正会員）

森田寿郎 (Toshio Morita)

1969 年 9 月 21 日生。1992 年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。1998 年同大学大学院博士後期課程修了。博士 (工学)。1997～1999 年日本学術振興会特別研究員。2000 年より早稲田大学理工学部助手。一貫して人間共存ロボットの開発研究に従事。日本機械学会，計測自動制御学会，バイオメカニクス学会会員。1997 年日本ロボット学会研究奨励賞受賞，2000 年日本機械学会 ROBOMECH 賞受賞。（日本ロボット学会正会員）

星野勇人 (Hayato Hoshino)

1975 年 8 月 15 日生。1998 年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。2000 年同大学大学院修士課程修了。現在キャノン株式会社勤務。

菅野重樹 (Shigeki Sugano)

1958 年 9 月 29 日生。1981 年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。1986 年同大学大学院博士後期課程修了。同大学理工学部助手，専任講師，助教授を経て，1998 年より教授。工学博士。研究・専門テーマは，人間適応能力を備えた機械システムを扱う知能機械学。日本機械学会，バイオメカニクス学会，計測自動制御学会，IEEE，ASME などの会員。自動化推進協会会長。1990 年第 1 回日本ロボット学会技術賞受賞。2001 年日本機械学会論文賞受賞。2001 年日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門学術業績賞受賞。（日本ロボット学会正会員）