

| | | |
|---------|--|---------|
| 氏名(本籍) | すずき そう いち ろう 鈴木 聡 一 郎 | (兵 庫 県) |
| 学位の種類 | 博 士 (情報科学) | |
| 学位記番号 | 情博 第 1 1 7 号 | |
| 学位授与年月日 | 平成 1 1 年 3 月 2 5 日 | |
| 学位授与の要件 | 学位規則第 4 条第 1 項該当 | |
| 研究科、専攻 | 東北大学大学院情報科学研究科 (博士課程) システム情報科学専攻 | |
| 学位論文題目 | 人間のスキル動作に基づくロボットアームの制御 | |
| 論文審査委員 | (主 査) 東北大学教授 猪岡 光 東北大学教授 林 叡 東北大学教授 中野 栄二 東北大学教授 出口光一郎 東北大学助教授 石原 正 | |

論 文 内 容 要 旨

1 序 論

近年、実社会における産業用ロボットの普及促進が図られたことにより、我が国はその生産量ならびに使用量ともに世界一となり、ロボット大国と呼ばれるようになった。組み立て・生産ラインでの実用は目覚ましい発展を遂げ、より複雑な作業への対応や汎用性が求められるようになり、動作の応答速度や繰り返し精度の向上、出力増大が図られるとともにダウンサイジングなどに着目した改善が行われてきた。これらの改善は、主にアクチュエータや計算機の高性能化およびロボットラインやセンサフュージョンの構築、ならびに治具やハンドの改良に負うところが大きく、ロボット本体の機構や制御の基本構成に関しては誕生以来、劇的に変化しているとは言い難い。その一方近年では、工業的応用分野が中心となる第二次産業のみにとどまらず、医療、福祉関連の分野などにおける応用に期待が高まっている。

本研究は、産業用ロボットに代表される実用化レベルのロボットの多くが、さらなる高性能化ならびに汎用性の向上を目指す中で、アクチュエータの飽和という現実的な問題により制限を受けていることに着目し、これを解決する一手段として、**Human Skill Acquisition** をロボットの構成および制御に適用することで、アクチュエータの負荷低減に有効な効率のよい動作を実現することを目的としている。**Human Skill** の中でも、より高い効率と大きな効果が常に要求されるスポーツ選手のスキル(**Sports-Skill**)を適用したロボットを **Sports-Skilled Robot (SSR)** と称し、手首のスナップ動作に関するスキルを有する **SSR** の特性と応用について検討した。

2 基礎式

本研究が解析的検討を主としたことから、はじめに各章での検討に必要な基礎式の導出を行った。肩関節と手首関節を取り扱った 2 関節 3 軸モデルを決定し、弾性部には片持ばりを基本とした連続体の振動解析を適用した。ハミルトンの原理により運動方程式を導出し、さらに二階の常微分方程式で表される状態方程式を導いた。

3 スナップ動作を伴う腕のスキル

人間は、手首関節のスナップ動作を行うことで、ボールをより高速で投げたり、あるいはゴルフスイングや釣りのキャスト動作のように、把持する道具の動特性に適応したスナップ動作を行うことで、大きな効果を得ることを可能にしている。このようなスキルをロボットアームに応用し、高性能化を図ることを目的としてスナップ動作を伴う腕のスキルを解析的に検討する。スナップ動作は手首関節の固定ならびに解放で行われるものと仮定し、道具先端（ペイロード）の運動エネルギー、ならびに肩関節の仕事に対する比を動作効率指数と定義し、これらの値を向上させるスキルを明らかにした。剛体を把持した場合は、スナップ動作により関節まわりの干渉力に大きな変化が生じ、これを利用するとペイロードの運動エネルギーを向上させることが可能なことを明らかにした。さらに鉛直面では、系の位置エネルギーが小さくなる下方のポジションで、この動作を行うと、効率指数をより大きく向上することが可能なことを示した。一方、弾性体を把持した場合は、動作中に道具先端の振動変位がはじめにゼロクロスするときスナップ動作を行うと、弾性ひずみエネルギーが効率よく運動エネルギーに変換されることを明らかにした。肩関節のトルク入力を時間に対して一定にすると、剛体より弾性体を把持した方がより大きな仕事を系に与えることが可能となり、結果的に動作効率指数も向上することが示された。以上の結果を具体的なスポーツであるゴルフスイングに置き換えてみると、手首の「ため」を意識し、シャフトの振動に適合したリスターンが大きな効果を得るための腕のスキルであるということができ、ゴルフレッスン書などで一般にいられていることと非常によく一致することから解析結果が妥当なものであると考えられる。

4 ゴルフスイングロボットへの応用

手首のスナップ動作に着目した SSR の直接的な応用例として、ゴルフスイングロボットを取り上げスキルを有する新しいロボットを提案するとともに、2軸モデルに関しては実験装置を用いた検証を行った。この動特性を検討し上級ゴルファーの特徴と比較することで、スナップ動作の解析結果の妥当性をより明確にすることができる。ゴルフ上級者の特徴としては、一般にスムーズな動作と手首の「ため」を利用した速いヘッドスピードが挙げられる。また、特性の異なるクラブに持ち替えても、その変化に適応したスイング動作を行うことができることが知られている。従来のロボットは、オペレーターがオフラインでスイング計画あるいはヘッドスピードを直接与える必要があり、上級者のようにクラブの特性変化に自然に順応したスイングを行うことができず、テストクラブの性能評価を行う際の信頼性が低かった。このような上級者のスキルをロボットで実現できれば、ゴルファーによるテストを必要としない信頼性の高い性能評価が可能となり、高性能クラブの開発ならびに開発コスト低減に結びつく。ロボットによる Skill Acquisition を実現するため、スイング動作はシャフト先端の変位がはじめにゼロクロスするとき手首のアンコックを行い、ダウンスイング後半は両関節ともに干渉駆動を行う設定とした。肩関節の入力トルク関数を台形で表し、クラブの慣性モーメントとシャフトの曲げ剛性に適応できるパラメータ決定アルゴリズムを示した。このことにより、ゴルファーの力量をトルク計画に反映させることが可能となり、仮想ゴルファーに対する最適クラブ設計が行えることを明らかにした。さらに、手首のねじり動作を考慮した3軸モデルにおいても、同様に簡単なトルク計画で精度良いスイング動作が行えることを示した。実験では、簡単なストッパーのみを用いた機構で、関節の解放が設定通り実現できることを検証した。加えて、駆動部の摩擦、粘性ならびに慣性に関するパラメータ同定を行い、補償トルクをオフライン計算することで、設定されたスイング動作を精度よく実現できることを明らかにし、実用化の可能性を示唆した。

5 スカラロボットへの応用

本研究では、SSR の基本構想をロボットの実用機に適用することで、アクチュエータの負荷を低減し高性能化を図ることを本来の目的としている。そこで SCARA ロボットへ応用した場合の動特性と、これに伴う制御手法について解析的に検討した。具体的な構成としては図1に示すように、2軸 SCARA ロボットに適用するため第2関節を非駆動関節とし、第2リンクの先端側を低剛性に設定したところに特徴がある。ゴルフスイングロボットと同様に、動作中のリンクの弾性により生じる干渉力を利用して非駆動関節の運動を制御し、動作の省力化ならびに高速化を図ることが可能な動作設定を決定した。このときの動

特性を検討した結果、SSR を応用することで駆動トルクの低減が図れることから、一般的な構成のロボットよりも重量物を高速で搬送する作業に適していることを明らかにした。さらにエネルギー収支のみならず、搬送時間や位置決め制御に要する仕事や時間を考慮しても SSR は有利であることを、搬送効率指数ならびに作業効率指数の検討から明らかにした。また第2関節のブレーキを解放した状態では、非ホロノミックシステムとなり滑らかな状態フィードバックでは安定化が不可能であり制御が困難になる。しかしながら低剛性リンクを有することで、一つのアクチュエータで両関節を同時に制御できる可能性を示し、動的制御により二つの関節角度を同時に指数安定化できることを数値計算で示した。位置決め制御では、非駆動関節のブレーキの ON/OFF 制御によりエネルギー散逸を利用した制振を行い、同時にブレーキ OFF の瞬間のみ計算トルク法による姿勢制御を行うという、ハイブリッド制御手法で高精度な位置決めを可能にした。

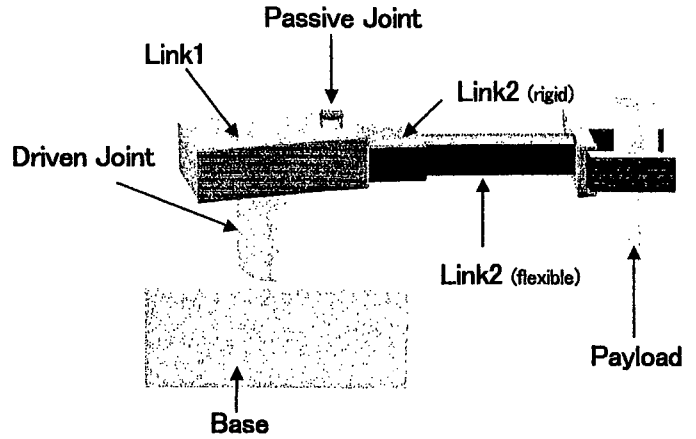


図1 スカラロボットタイプの SSR 概観

6 結 論

本研究で得られた成果により、過去に例のないスポーツスキル搭載型ロボットである SSR 本来の目的が、十分実現可能であることを示すことができた。今後は、さらに一つのタスクに対して複数のアクチュエータを協調制御することによる動作の高効率化、ならびに非ホロノミックシステムとしての可制御性の検討ならびに実験による検証を進めていきたい。また、人間が習得しているスキルの検討に関しては、直接人間の動作計測を行う必要があると考える。最後に、ここで示した具体例にとどまらず、Human Interface あるいは Human Interaction などを具現化すべき自動制御システム、例えば医療・福祉ロボットやヒューマノイド、パーソナルロボットあるいは義肢、冗長ロボットの軌道計画などに対して、SSR の基本思想は非常に有益な情報を与えるものであると確信する。

論文審査の結果の要旨

人間は、腕の関節を巧みに回転あるいは固定することにより、限られた筋力のもとでも大きい運動エネルギーを発生することができる。特にスポーツ選手においては、練習に基づく高度なスキルによってこのような動作を実現している。本論文は、人間のスキル動作を解析し、その結果をロボットのハードウェア構成ならびに制御に適用してアクチュエータの負荷低減が可能なロボットアームを提案したものであり、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、解析的な取り扱いに必要となる基礎式を導出している。把持する道具の弾性を有効に利用するスナップ動作のスキルに着目するため、肩関節と手首関節およびリンクの弾性を取り扱う2関節3軸モデルを求め、状態方程式を導いている。

第3章では、手首のスナップ動作におけるスキルを解析的に検討している。この動作は道具先端部の運動エネルギー向上に有効であり、ポテンシャルエネルギーの変化や道具の弾性振動位相に合わせた、いわゆる手首の「ため」が大きな効果を生むことを力学的に明らかにしている。この結果は、ロボットアームの軌道計画に有用な成果であるとともに、人間工学やスポーツ工学における重要な知見である。

第4章では、スナップ動作のスキル解析結果を応用した新しいゴルフスイングロボットを提案している。このロボットの動特性とゴルフ上級者の特徴が良く一致することを数値シミュレーションにより示すとともに、実験によっても検証している。これらの結果は、ゴルフクラブの信頼性の高い性能評価が可能なロボットの設計基準を与えるものであり、実用上有用な成果である。

第5章では、スナップ動作を応用した非駆動関節と低剛性リンクを有するスカラ型ロボットを提案し、重量物を高速で運搬するのに適していることを解析的に明らかにしている。さらに、このロボットが非ホロミック拘束を受けることに着目し、非線形性を補償する動的制御と、エネルギー散逸を発生させるブレーキ機構のオン・オフ制御を複合化したハイブリッド位置決め制御手法を提案している。この結果は、ロボットの軽量化ならびに高性能化に極めて重要な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、人間のスキル動作をロボットアームの機構ならびに制御手法に応用することで、アクチュエータの負荷低減と干渉力の有効利用が実現できることを理論的ならびに実験的に示したものであり、ロボット工学、人間工学および情報科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。