

	さとう だいすけ			
氏名	佐藤 大祐			
授与学位	博士 (工学)			
学位授与年月日	平成 17 年 3 月 25 日			
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項			
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 航空宇宙工学専攻			
学位論文題目	高速パラレルロボットへの柔軟な作業動作の教示および再生			
指導教官	東北大学教授 内山 勝			
論文審査委員	主査 東北大学教授 内山 勝	東北大学教授 小菅 一弘		
	東北大学教授 江村 超	東北大学教授 中野 栄二		
		(情報科学研究科)		

論文内容要旨

本論文は、高速動作と高精度の位置制御および力覚センサなしで力制御を実現可能な高速パラレルロボット HEXA を対象として、ロボットへの柔軟な作業動作の教示・再生を目的とする。

近年、複数の研究機関によって、人間共存型ロボットの研究開発が盛んに進められ、21 世紀の新産業として急速に立ち上がりつつある。このように、ロボットの利用範囲は従来までの産業用途だけに止まらず、より人間にとって身近な環境へ拡大しており、その社会的関心はさらに高まっている。

このような背景の中で、これからのロボット研究においては、従来までの

- 生産現場での、単純作業や過酷な作業からの労働者の解放、減少している熟練技能者の能力の保存とその機械化

に加えて、

- 災害現場、宇宙環境や深海、原子力施設など、人間の立ち入ることの難しい極限環境下における作業代行や、
- 遠隔地医療、義手や義足のような医療機器への応用、福祉現場での介護者の補助など、人間の社会環境での協調・共存

などが望まれている。

このような要求に対して、ロボットには決められた作業動作以外に様々な作業を柔軟に実現する能力が必要となっており、さらに、その動作を実現できるロボットシステムの開発も不可欠である。しかし、現在のロボット研究には、動作や行動の完全自律化を目標としたものが多い。作業動作が完全な自律行動によって実現されるのであれば、それは最も有益であるが、人工知能研究が大きな進展を見ない限り、ロボットが自律的に実作業を行う段階へ達するには時間がかかる。したがって、現段階において、ロボットが柔軟な作業動作を実現するためには、いかにして作業を簡単に効率良く教示し、その動作を確実に柔軟に再生できるかが鍵となるが、その実用的な手法、特に、柔軟な動作には不可欠な力制御を扱う手法は少なく、さらなる研究が必要である。

そこで、本論文では、ロボットが完全な自律行動を獲得する前段階において、従来、産業用ロボットへ適用してきた教示・再生の概念を発展させ、次世代のロボットに必要な柔軟な作業動作の教示・再生の枠組みを作り、さらに、その手法を適用したロボットシステムの開発に取り組んでいる。柔軟な作業動作の実現能力を備えた高速パラレルロボットを対象とし、使用する操作者、人間の知識や経験を容易にロボットの動作情報へと反映させることが可能な作業教示手法を提案する。さらに、ロボットの運動性能を引き出し、柔軟な作業動作を実現可能なオフライン作業教示・再生システムおよびロボットシステムを開発、その有用性を検証している。

本論文は全編 5 章より構成される。第 1 章は序論であり、本研究の背景および目的を述べている。第 2 章では、まず、Fig. 1 に示す柔軟な作業動作の設計手法を提案している。ロボットに柔軟な作業動作の実現能力を備えさせる制御モードを決定し、位置制御、力制御、コンプライアンス制御の三つの異なる制御則を組み合わせた統合制御則を適用している。そして、適切な動作計画と高速性能の活用が可能なオフライン教示を採用した作業動作設計手法を提案、それにより生成されるロボットコマンドのセットを決定している。この設計手法を実現するため、グラフィックユーザインタフェース、3D グラフィックスシミュレータ (Fig. 2 参照)、ロボット制御データセットを生成する作業動作生成システムの三つのサブシステムから構成されるオフライン作業教示システムを構築し、ロボットの制御システムと融合したロボットシステムを開発している。さらに、開発したオフライン作業教示システムを用いて、パラレルロボットへの作業教示・再生実験により、その有効性を明らかにしている。

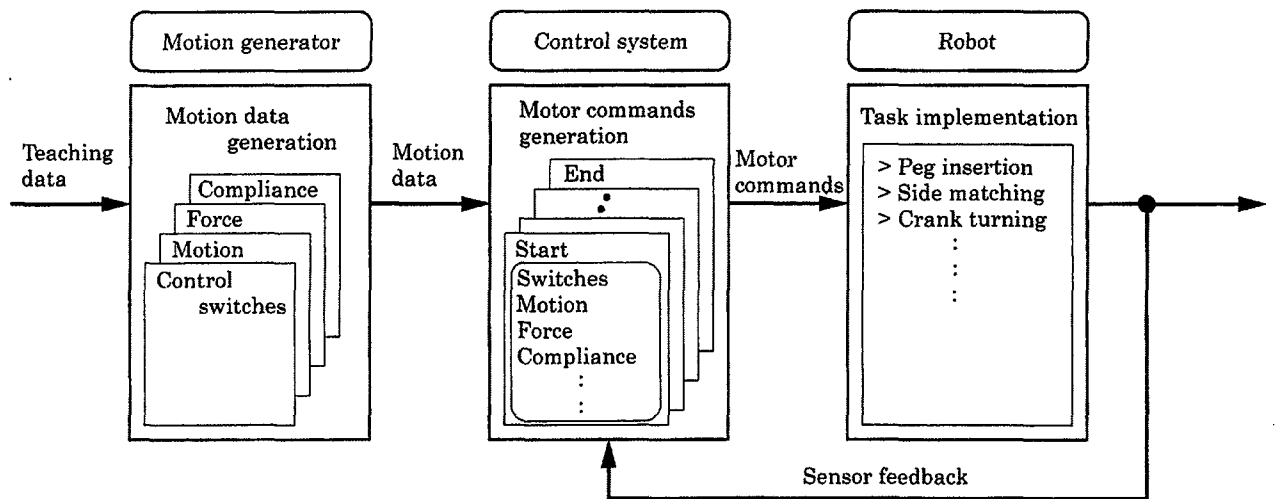


Fig. 1: Design concept of dexterous motion

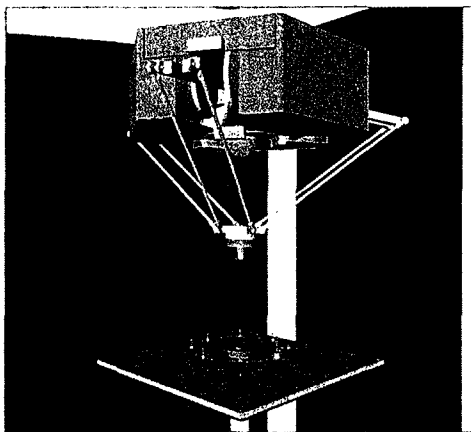


Fig. 2: 3D graphics simulator

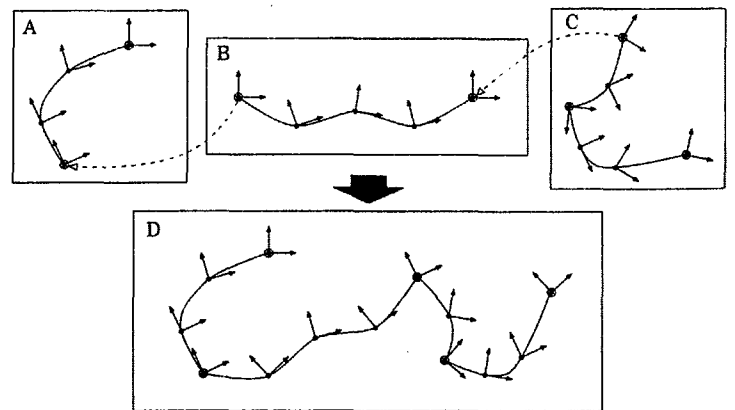


Fig. 3: Concept of the elemental motion

また、本システムでは「要素動作」と呼ぶ概念が導入されている。この概念は、Fig. 3 に示すように、D のような一連の作業動作を A, B, C に示される複数の小さな動作の連結体として取り扱う。この要素動作を単位とした編集機能を備え、動作データベースの構築し過去の教示動作の再利用も可能にすることで、グラフィックユーザインタフェースを用いた数値教示では常に問題となる動作生成段階での作業手順を大幅に減少させ、作業状況に合わせた制御データセットの設定を容易にしている。

第3章では、ここまで構築してきたオフライン作業教示・再生システムに対して、人間の手作業動作を実環境と仮想環境の二つの環境下で計測可能な計測システムを追加している。そして、これらの計測システムから得られる作業中の人間の手の位置・力情報を作業の特徴を表すデータとしてとらえ、ロボットへの作業教示データとして利用することによって、柔軟な作業動作を実現するロボットモーションを生成する。Fig. 4に拡張された本作業教示・再生システムを示す。また、Fig. 5に3次元磁気位置センサと力覚センサにより構成される実環境下での人間の動作計測システムを、Fig. 6に6自由度ハプティックインタフェース、3次元磁気位置センサ、ヘッドマウントディスプレイから構成される仮想環境下での人間の動作計測システムを示す。

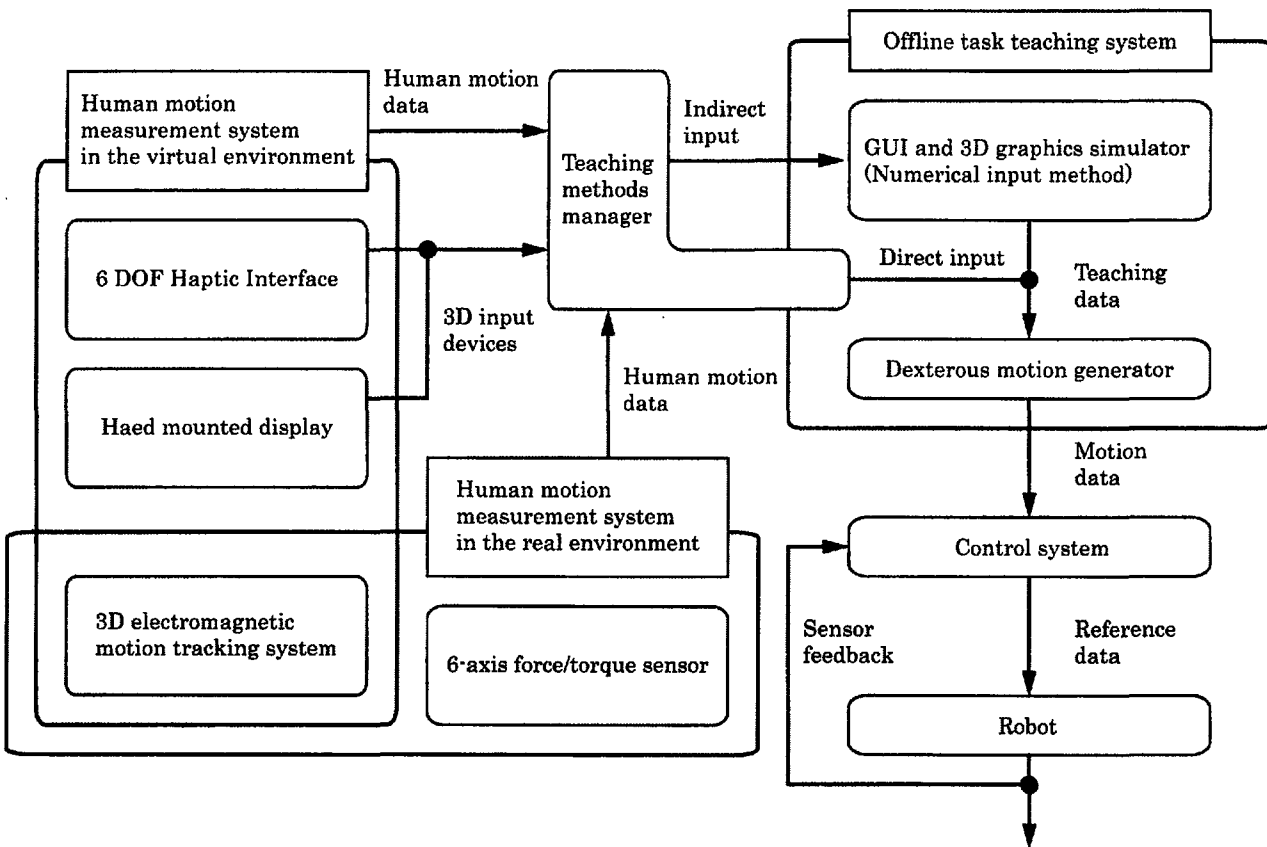


Fig. 4: Overview of the teaching system based on human motion

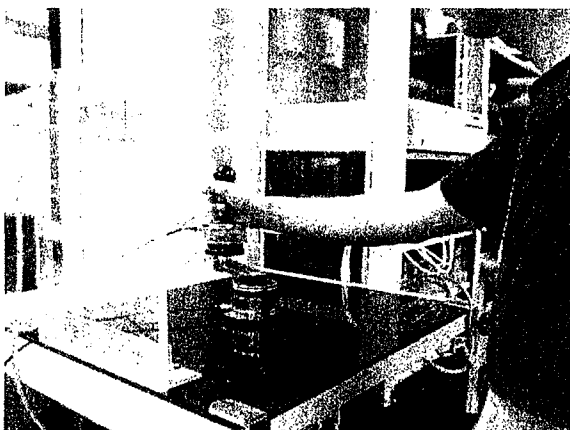


Fig. 5: Human motion measurement system in the real environment

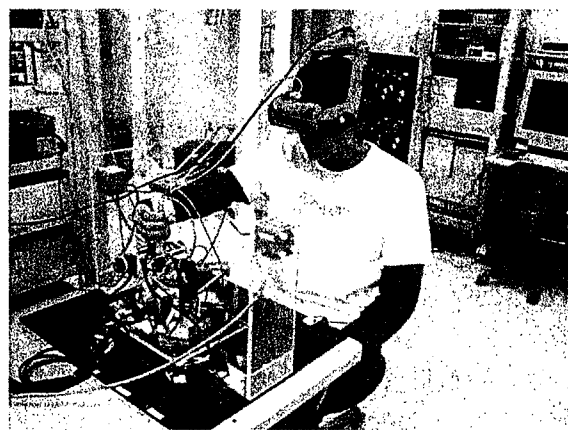


Fig. 6: Human motion measurement system in the virtual environment

これらの追加機能は教示手法管理部によって適宜使い分けることが可能である。実環境を利用した動作計測システムでは実際の作業環境を製作しなければならないが、正確な動作情報を計測することが可能であり、基本動作の教示に適する。仮想環境を利用した動作計測システムでは、計測される動作情報が実環境下での値よりも劣るが、作業環境をバーチャルリアリティ技術によって提供できるため、その変更は容易であり、複数の作業動作が連続する一連の動作情報を計測することに適する。

このように、実際の人間の作業動作情報を教示データとして利用することは、ここまで構築してきた作業教示システムの課題点であった、新規動作の初期教示における大きな教示負担と2次元空間のみでの作業教示を改善し、より柔軟な作業教示環境をオペレータに提示可能にする。さらに、これらの追加機能を利用することによってロボットの遠隔操作も可能になる。よって、オンラインでの作業教示とオフラインでの作業教示を適宜組み合わせ、柔軟な作業動作を実現するためのロボットモーションを生成することにより、人間の作業戦略の巧みさの獲得を可能にし、短時間で容易に作業動作の教示・再生を実現でき、これらの機能は本ロボットシステムの有効性を大きく高めている。

第4章では、ここまでのオフライン教示システムへの取り組みに加えて、対象とした高速パラレルロボットの作業対応能力を向上させるために、ロボット自体の性能向上に取り組んでいる。対象としてきたパラレルロボットの運動性能に大きく影響するのは、ジョイント部に使用されているボールジョイントの性能である。これまでに、我々は80 [deg.]の広揺動角を持ち、安価で軽量という優れた特徴を持つボールジョイントを開発してきた。しかし、組み付け精度の不足と摺動面摩擦が大きいという問題点があり、ロボットへの適用は難しかった。そこで本論文では、これらの問題点の改善したFig. 7に示す小型・高精度の新ボールジョイントを開発し、ロボットへの動作検証を行って、その作業対応能力の拡大を行った。

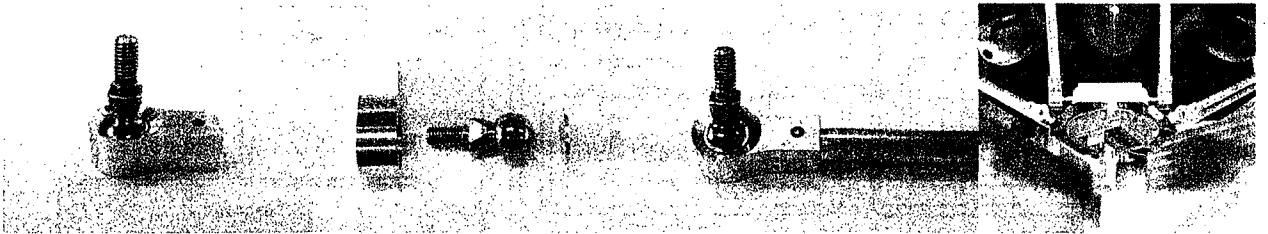


Fig. 7: New ball joint and rod of HEXA robot

この開発したボールジョイントに対して、引っ張り荷重やすきま精度などの評価実験を行った結果、組み付け精度および摺動面摩擦の問題点は解決でき、機構部品としての性能向上は十分であることを確認できた。しかし、対象であるパラレルロボットへ適用した場合の制御性能評価実験からは、これまでは大きな摺動面摩擦によって発生していると考えていた制御時に発生する機構部の振動が、摺動面摩擦にだけ起因するものでないことが明らかになった。よって、パラレルロボットの作業対応能力の向上するためには、今後、この制御面での問題点を改善しなければならない。

第5章は結論であり、本論文をまとめ、さらに明らかになった今後の課題についても考察している。本論文は、ロボットへの柔軟な作業動作の設計手法を提案し、実際にそれを実現するロボットシステムを開発することで、柔軟な作業動作の教示・再生手法の枠組みを示している。さらに、これまでに検討が少なかった力制御の教示およびロボットの作業動作の高速化についても考慮し、オフライン作業教示システムと人間の動作情報を教示データに利用した柔軟な作業動作の教示・再生を実現しており、その実用性はたいへん高い。さらに、本論文では高速パラレルロボットを対象としているが、本技術はどのようなロボットへも適用可能である。したがって、その汎用性も非常に大きく、今後は炉ロボットの遠隔操作やロボットによる技能の実現などへの発展が期待でき、ロボット工学や機械工学、さらには人間工学への幅広い寄与が望める。

審査結果の要旨

近年、ロボットには、従来の産業用途だけではなく、極限環境下や人間社会内での応用が求められ、決められた作業動作以外の様々な作業動作を柔軟に実現する能力が求められている。このような能力を実現するには、いかにして作業を簡単に効率良く教示し、その動作を確実に再生できるかが、ひとつの鍵となる。しかし、柔軟な動作に不可欠な力制御を扱う教示・再生手法の研究は少ない。これに対して、本論文は、特徴ある様々な応用分野を持つ高速パラレルロボットを対象とし、力制御により実現される柔軟な作業動作をオフラインで教示・再生する手法を提案し、これにより、教示者の知識や経験を容易にロボットの動作情報へ反映させることができるシステムの構築を論ずるもので、全編5章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景及び目的を述べている。

第2章では、ロボットに柔軟な作業動作を行わせるための制御モードのセットについて考察し、ロボットを適切に動作させるためのコマンドのセットを決定している。そして、この枠組みで、オフライン教示による作業動作設計手法を提案し、ロボットの制御システムと融合した新しい教示・再生システムを実現している。これはシステムデザイン上の重要な成果である。本システムには要素動作と呼ぶ概念が導入され、一連の作業動作を複数の小さな動作の連結体として取り扱っている。これにより、動作データベースを構築し、過去の教示動作を再利用することが可能となり、作業教示が容易となっている。

第3章では、第2章で述べた教示・再生システムに人間の動作情報を取り込み、これにより、ロボットの柔軟な作業動作を生成することを提案している。この機能により、提案する教示・再生システムが、より汎用性の高いシステムに拡張される。人間の動作情報を計測し、教示データとして利用することで、オフライン教示の負担が軽減され、短時間での教示・再生が可能となる。また、人間の持つ作業戦略の巧みさをデータとして取得することができ、この利用により、巧みなロボットの動作が実現でき、システムの汎用性が向上する。

第4章では、対象とする高速パラレルロボットの機構部品の性能向上について述べている。このロボットの運動機構の鍵となる要素は、広揺動角のボールジョイントである。この組み付け精度を向上させ、摺動面摩擦を低減させるための方法を提案し、小型、高精度、低摩擦の新ボールジョイントを開発している。これにより、対象とするロボットの運動性能が向上し、教示・再生システムの適用範囲が拡大する。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、ロボットの柔軟な作業動作の設計手法を提案し、それを実現するためのオフライン教示・再生システムを構築することで、柔軟な作業動作の教示・再生の枠組みを示し、またその有効性を実証している。提案された手法及び構築されたシステムの汎用性を考慮すると、本論文は、ロボット工学及び機械工学、さらには人間工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（工学）の学位論文として合格と認める。