

論文の内容の要旨

論文題目 Mobility Enhancement Control of Humanoid Robot based on Reaction Force Manipulation via Whole Body Motion (全身運動による反力操作に基づいたヒューマノイドロボットの高機動化制御)

氏名 杉原 知道

本論文では、ヒューマノイドロボットにおける機動性拡大、特に操縦者からの指令への敏捷な応答や、環境や障害物との衝突などによる大きな外乱の柔軟な吸収を実現する制御器の設計を目的とする。これは生物の反射・平衡感覚の実装に相当し、高次行動のための階層的制御系を構築する際に根幹となるものである。

力学系としてのヒューマノイドロボットは強い非線形性を有し、運動制御の問題に閉じた解を持たない。加えて実環境は未知の事象に富むため、上記のような基本的段階においてすら大きな困難がある。特に、ヒューマノイドを含む脚運動系は慣性系に固定点を持たず、原理的に、各関節に働くトルク(内力)を環境との相互作用を通して反力(外力)に変換することで運動するため、環境から受ける反力をいかに操作するかが第一の問題となる。また多数のリンクおよび関節から成り、多様な動作表現および高度なタスク遂行が可能である反面、複雑な大自由度系の管理が要求されることが第二の問題である。これは、関節数の増加に伴い計算コストも増加するという実装上の問題も含む。これまでに多くの研究がなされてはいるが、これらの問題に十分な解を与えた例はなく、現在あるヒューマノイドたちの運動能力は未だ貧弱であり、機動性拡大のためには理論的・技術的なブレイクスルーが必要である。

これらの問題を解決するために本論文では、重心と、系に加えられる全外力およびその作用点であるゼロモーメント点(ZMP)との関係を抽出した比較的単純なモデルによって、ヒューマノイドロボットのダイナミクスを近似的に表現し、制御戦略を検討する指針とする。更にその単純なモデルと厳密なモデルとを補完するために、重心ヤコビアン概念を導入する。系に加えられる全外力は、それと等価な重心加速度に変換できるので、重心運動を用いて系全体のダイナミクスを表現することが可能である。重心ヤコビアンは全関節角速度から重心速度への写像であり、これによって、厳密な運動方程式を用いなくても、操作量として決定される系に加えられるべき反力と等価な全関節の運動が、近似的にはあるが、大幅に低減された計算コストで得られることになる。

また提案する制御戦略は、予め計画した全身の目標軌道を再現するいわゆるパターンベースな方法と、幾何学的な目標軌道を持たず与えられた指令に即座に応答する非パターンベースな方法に分けられる。

前者は、既知の環境で高度なタスクを行なうのに適するが、モデル化誤差などの外乱を吸収する安定化制御の併用が必須である。外乱の吸収は、接地状態を維持するための力パターンに関するものと目標軌道に収束するための幾何パターンに関するものの二者を同時に考慮する必要があるが、これらが互いに矛盾する状況は頻繁に起こる。本論文では、これらを各々考慮する際の時間的条件が異なることに基づき、多重な時間の枠組の中で矛盾を解決していく時間二重外乱吸収法を提案する。

後者は、高度なタスクへの応用は難しいが、環境の未知性や指令の急変更等に対応できる頑健性を有する。このとき、ヒューマノイドのダイナミクスを表す単純なモデルが倒立振り子と類似のダイナミクスを有することに着目し、水平方向の運動制御は倒立振り子の支持点操作をそのまま応用してZMPを操作することで行なう。また鉛直方向の制御にはインピーダンス制御を応用する。その際、インピーダンススイッチング概念を導入することによって重力方向のエネルギーを制御し、接地状態の操りによる跳躍などの実現が可能であることを示す。

更に、提案した制御理論を検証するために開発した実験用小型ヒューマノイドロボットの機構およびハードウェア/ソフトウェアシステムについて述べる。