

冗長自由度を有する巧みな多関節リーチング運動の生成

関本 昌紘

人間の上肢は関節冗長性を有するにもかかわらず、自身の腕を自在に動かせる。しかし、この場合、運動学的にみれば、指定した手先位置を実現する腕の姿勢は無数に存在し、一意には決まらない。これは、運動生理学では「ベルンシュタインの自由度問題」、ロボティクスでは「逆運動学の不良設定問題」と呼ばれ、冗長関節アームの運動制御の難しさの起因となっている。このような人間の運動の仕組みを明らかにできれば、冗長関節ロボットアームをより巧みに動かし、日常作業に役立たせることが期待できる。

本論文では、リーチング運動を力学的に解析することを通して、未解決な冗長自由度問題に挑み、人間のもつ「巧みさ」の能力の根源に迫る。特に、力学的な解析より、協調のとれた関節ダンピング形成が熟練作業を生み出す鍵となることを示す。また、冗長関節アームの運動制御において、ある評価関数を最適にする一意の関節軌道に帰着する従来の手法とは異なり、正確なダイナミクスパラメータを必要とせずに、作業空間での位置誤差フィードバックとダンピング形成による新たなアプローチを提案し、その有効性を議論する。

最初に、4関節アームによる平面内でのリーチング運動を考え、関節ダンピングとともに、手先が目標位置へ向かう意識的な力を作業空間での仮想バネ力として表現した「仮想バネ仮説」の概念を示す。この手法では、一連の関節ダンピングを慣性行列の平方根のオーダーで決めると自己運動が起こらず、協調のとれた運動が行える。これを「多様体上の安定性」および「部分多様体への可遷移性」の概念を用いることで理論的に明らかにする。次に、仮想バネと並列する仮想ダンパー効果を考慮した「仮想バネ・ダンパー仮説」に拡張する。これにより、熟練運動に見られる直線的な手先軌道を容易に生み出せることを示し、この場合の収束性も理論的に解析する。この方法を、さらに、3次元リーチング運動、冗長関節ロボットアームの運動制御、ハンド・アームシステムによる物体操作へ適用する。また、ここまではPTP制御を考えてきたが、任意の目標軌道へ追従するため、作業空間での繰り返し学習制御法を提案し、その有効性を検証する。従来の学習法は関節空間レベルでしか検討されてこなかったが、適切なダンピング形成により関節空間の次元より低次元の作業空間での軌道追従学習も可能なことを示す。