

## 第5章 結論

本研究では、人とロボットによる協調運搬を(a)「接近」、(b)「把持」、(c)「移動」に分割して考えたとき、(a)、(b)はすでに行われていると仮定し、(c)の対象物の移動方法について研究テーマを絞り、従来提案されてきた等方的なインピーダンス制御による協調運搬手法の問題点の指摘とその解決手法の提案を行った。具体的には、(1)「水平面内の協調運搬」、(2)「3次元空間内の協調運搬」、(3)「移動ロボットを用いた協調運搬」の3つを中心に議論を行い、人とロボットが長尺物の端点を1対1で向かい合って把持し任意の目的位置へ協調運搬する手法として、仮想的に非ホロノミック拘束を与えることにより対象物の挙動を理解しやすいものにする協調運搬制御手法を提案し、その効果の確認を行った。本研究の結論を要約すると以下の通りである。

第2章「長尺物の水平面内の協調運搬」では、人とロボットが協調して水平面内の目標位置へ対象物を運搬するための手法について検討した。従来より人とロボットの協調運搬手法として用いられてきたインピーダンス制御は、力を与えた方向へ対象物を自由に動かすことができた。しかし、人がロボットの力センサに十分な力を与えることができない場合、対象物が横滑りするなど、人の意図しない挙動が発生する問題がある。特に、長尺物や大型物体などの対象物を運搬する場合、人とロボットの把持点間距離が離れるためトルクによる操作が困難になる。また、並進力のみによる協調運搬では、横滑りを防ぐ操作は複雑であり困難である。そこで、これらの問題を解決するために、ロボット把持点へ対象物長軸方向を向いた単車輪と等価な仮想非ホロノミック拘束を与える手法を提案した。提案手法を用いることで、長尺物の運搬になると扱い難いと考えられるトルク操作を扱う必要がなくなり、並進力のみを用いた協調運搬が可能となる。また、長尺物法線方向に横滑りが生じないために、手押し台車を扱う感覚で直感的に操作をすることができる。さらに、単車輪と同様の非ホロノミック系であるために、可制御性が成立し、対象物を任意の位置、姿勢に運搬することができる。実際のロボットへ拘束条件を実現する手法として、ロボットの把持点に構成される手先座標系に異方性を持たせるインピーダンス制御を提案した。人とロボットによる協調運搬実験により、提案する仮想非ホロノミック拘束を与える手法は対象物の位置決めにおける作業を容易にすることを明らかにした。操作対象の挙動が人にとって理解しやすい挙動へ限定されたことによって、操作感が向上したものと解釈される。

第3章「3次元空間内の協調運搬」では、3次元空間内の対象物の位置決めについて検討した。まず、第2章で提案した単車輪の拘束を模倣した非ホロノミック拘束を鉛直平面内の協調運搬に適用することを提案した。提案手法による利点は、対象物を並進力のみで扱え、制御則の切り替え無しに鉛直平面内の任意の位置・姿勢へ移動できることである。水平面内の協調運搬との決定的な違いは、鉛直平面内のこのような操作は、人にとって経験のないことである。しかし、人が水平面内で荷車などの車輪を有した道具を扱う能力は、鉛直平面内の動きに変更されても応用する能力があるのではないかと考えた。また、提案手法による運搬時にロボットが支える対象物の重量補助について検討し、対象物の傾

きによらず一定の重量補助を行う方法を提案した。人とロボットによる鉛直平面内の協調運搬実験をすることで、人は実際に水平面の挙動を鉛直平面に応用しながら目標位置までの運搬が行えることを確認した。この結果を踏まえ、鉛直平面内と水平面内の協調運搬を組み合わせ、3次元空間内の任意の位置・姿勢6自由度に対して協調運搬する手法を提案し、3次元空間内における仮想非ホロノミック拘束を用いた協調運搬手法の可制御性の証明を行った。人とロボットによる協調運搬実験の結果、提案手法は人の非ホロノミック拘束を扱うという能力の範疇にあり、制限された動きの中で目標位置までのパスプランニングを行うことが可能であることが確認された。したがって、単車輪のような非ホロノミック特性を備える対象物の移動方法は、3次元空間の協調運搬手法へ拡張しても、人とロボットのインターフェースとして有効であることが明らかとなった。

第4章「移動マニピュレータを用いた協調運搬」では、人と協調運搬するロボットに広い作業領域をもつ移動ロボットを用いることを考え、提案する非ホロノミック拘束を用いた協調運搬手法の導入の可否について検討を行った。はじめに、移動台車を使った協調運搬を検討し、非ホロノミック移動台車と全方向移動台車の2種類に分け、それぞれの移動台車に対し非ホロノミック拘束の導入を考えた。一部の非ホロノミック移動台車を除いて、提案する非ホロノミック拘束を用いた協調運搬手法は容易に導入可能であることを確認した。次に、3次元空間内の広い作業領域で協調運搬を行うために、移動マニピュレータを用いた協調運搬について検討した。マニピュレータと移動台車の協調制御手法は、「移動台車主体の制御」と「マニピュレータ主体の制御」の2つのアプローチを考えた。移動台車を主体とした制御は、平面内の移動に移動台車の高出力な駆動力を主に利用する移動方法である。移動マニピュレータの冗長自由度を利用しつつ、マニピュレータは対象物の把持に専念することができるので、マニピュレータの可搬重量を越えるような重量物の協調運搬に有効である。マニピュレータを主体とした制御は、システム全体が安定性を維持しているときマニピュレータのみの動作で人との協調運搬をサポートし、その安定性を崩しそうになったときのみ移動台車とその作業領域を補償する手法である。マニピュレータの可搬重量に依存する手法であるので、対象物の重量が比較的軽いときに有効な手法である。移動台車の移動が最小限に抑えられるため、エネルギーの省力化やシステムのレスポンスの低下を防ぐことができる。双方の移動マニピュレータの協調制御手法へ、仮想非ホロノミック拘束を与える協調運搬手法を導入し、移動台車のみでは実現することのできない3次元空間の目標位置へ対象物の運搬が行えることを確認した。仮想非ホロノミック拘束を与える協調運搬手法はこれらの移動ロボットへ容易に導入が行え、一般性を持った手法として第2章、第3章で確認された利点を得ることができた。

以上の研究結果から、非ホロノミック拘束を与え、ロボットの動きを限定することで、人の使う操作を限定し、人がロボットを扱う要領を人が普段使ったことのある道具に見立てることにより、扱いを容易にするとともに、ロボットの動きは人が想像した通りの動きを裏切らず、さらに、制御則の切り替えのない連続した動きで目的位置まで運搬することが可能になった。いわば、アナログ的な道具そのものの動きをデジタルのかたまりであるロボットに導入することで、人のアナログ的な感覚を使った協調をするという点が本手法の特徴であり、利点である。この手法は、デジタルなロボットにとって、アナログなインターフェースを備えることと同じであり、アナログな人にとって扱いやすい手法になるものと考えられる。今後、このようなアナログ的なヒューマンインターフェースを備えることで、デジタルとの境界を埋めていくことが我々ロボット研究者の役割ではないかと考える。