

第1章 緒論

1.1 本研究の背景

様々な場所でロボットが活躍する現在、一般にロボットといわれるものは産業用ロボットを意味するように、人から隔離された状態で単純な繰り返し動作をするにとどまっている。これらのロボットは人を単純労働から開放し生産性を高め、人々の生活を豊かにするために貢献してきた。これからは、ロボットが人と共存するためのシステムを開発し、その作業範囲を人の生活する同一空間に広げることで、建設業、流通業、医療・福祉現場、家庭、オフィスなど様々な分野へ応用することが可能になると考えられる。ロボットは力で人に勝り、人は知力や柔軟な判断でロボットに勝る。そこで、お互いの不十分な機能を補い、人の生活をサポートする技術の開発が進められている。病院内で患者の抱きかかえを補助する装置や工場内で重量物の運搬を補助するパワーアシスト装置はそれらの一例である [1]-[16]。パワーアシスト装置は人が重量物を扱うとき、操作者の負担を軽減することができるため様々な応用分野が考えられている。特に、高齢化社会 [17, 18] を迎える近年、高齢労働者や女性労働者のための作業補助装置や体の不自由な方が家庭内で健常者と共に生活を送るための身体補助装置には大きな期待が寄せられている。一方、独りでは扱い難いと考えられる大型物体や長尺物などの対象物は、パワーアシスト装置を用いても扱いが困難になることが想像される。このような対象物に対し、人とロボットが共同で把持することで、人の運搬を補助するアシスト装置の提案がされている [19]-[49]。人は自分の身体能力を超えた物を持ち運ぼうとしたとき、複数人数で協力して支えることで一人一人の負荷を減らし対象物を運搬することがある。このような人同士の協調運搬の片側をロボットが代替することで、人とロボットによる協調運搬が実現できれば、アシスト装置の更なる用途の拡大や応用分野が期待される (Fig.1.1)。

近年、コンピュータ技術や計測技術の進歩により、機械にある程度の知能を持たせることが可能になりつつある。つまり、人が主に従事してきた機械には任せることのできない仕事も、機械技術が導入できる可能性が生まれた。人と機械との距離が近づくことで問題となるのが、機械を扱う上での安全性と機械を扱う人とのインターフェースの設計に注意を払うことである。人と協調する機械は、人と安全に接触し、柔軟なコミュニケーションができることを要求される。そこで、人と協調行動を行うロボット開発の方向性の一つに、人と同様の機能をロボットにもたせることで、人同士の協調運搬を模倣する方法が考えられる [48]-[50]。人は目で対象物や目的位置を認識し、周囲の状況を把握する。また、言語によるコミュニケーションでお互いの意思を確認し情報を共有する。さらに、押された引かれたなどの体性感覚により、外力に倣うことで対象物の移動を柔軟に行っている。そこで、人と同様の機能をロボットに導入することを考えると、ロボットに人の視覚、聴覚、触覚を再現する必要がある。目的位置を確認する視覚を実現するためには、カメラ映像より取得された情報を認識するための画像処理技術が必要になる。また、人と言葉によるコミュニケーションをとるためには、音声を認識する技術、それを理解し行動に移す技術が

必要となる。さらに、それらの情報を組み合わせた知能的な処理をすることで人と同様の協調運搬が可能になる。しかし、画像処理や音声認識の研究開発は進んでいるものの、人と同等の機能を持たせることは困難である。

一方、扱う情報を限定し人との協調運搬を実現する手法が提案されている。現在、主に人とロボットの協調運搬手法として提案されているのは、インピーダンス制御 [51] を応用した手法である。この手法は、人が下位のレベルで行っている体性感覚を使った対象物の運搬と同様の動きをすることができる。人の体性感覚を代替するセンサとしてマニピュレータの手首に力センサを備え、対象物を把持しているエンドエフェクタに加わる力を測定する。その計測された力の方向へ做うようにマニピュレータを制御し、人との協調運搬を実現する。ロボットは対象物の重量を全て支え、人の加える力を外力として計測、その方向へ容易に動くことができるように対象物の代表点へ仮想的な慣性・粘性ができるだけ小さく設定される。通常、このときのインピーダンスパラメータは、全方向へ等方的に決定されるため、操作者はあたかも無重力空間に浮いている物体を操るよう自由な方向へ移動させることができる。以降、このようなインピーダンス制御による手法を「等方的なインピーダンス制御」と呼ぶ。等方的なインピーダンス制御による人とロボットの協調手法は、マニピュレータの把持点や操作ハンドルで計測した力に柔軟に做うことができる。しかし、それは人が力センサに移動させたい方向へ十分な力を伝えられることが前提である。人の把持する場所とロボットの把持する場所が離れているとき、人はロボットの力センサに対し十分な力を加えることが難しくなる。

具体的に人とロボットが向い合って対象物の離れた点を把持し協調運搬する場合を考える。このとき、人とロボットの向い合った長軸方向の力は、ロボットへ直接伝えることができるため扱いが容易である。一方、ロボット側の把持点に法線方向の力を与えようとしたとき、人は把持点でトルク操作をしなくてはならない。このトルク操作は人とロボットの把持点が離れるほど大きな操作力を要求し、人にとって扱いにくい操作である。つまり、主に用いることのできる操作は並進力のみとなる。しかし、並進力のみを用いた運搬を試みると、対象物は慣性力の影響により横滑りの動きが発生し、位置決めは困難になる (Fig.1.2 左)。これらの問題は、ロボットが全方向へ移動できる等方的なインピーダンス制御がされているために発生する。つまり、ロボット側の全ての動きに対応しなくてはならないため、操作者にとって扱うことの困難な力を要求したり、操作者の意図していない力が発生しロボットがその力に做って横滑りの挙動をすることが操作感の悪化に繋がる。一見、自由な操りが行えると想像される無重力空間で物を扱うような協調運搬手法は、人が普段経験したことのない動きであることから、実際の扱いと人の持つイメージに隔たりがあり、操作が困難になる。これらの問題を解決するためには、人が容易に想像できる動きを対象物に行わせる必要がある。そこで、そのような動きの例として人が日常扱う物の操り、特に道具の操作について考える。小菅らは、操作者と環境の間にある機械システムにおいて、人の使用する道具のような力学特性を仮想的に再現する「仮想ツール」の概念を提案し、環境や人の特性がわからない場合においても、操作者が加える力の増幅率とシステムの操作性を指定できる制御系の有効性を報告している [7]。しかし、人とロボットの協調運搬を考えた場合、操作者と操作対象の間に機械を介すことができない。したがって、直接このような道具の概念を用いることは不可能であり、異なる手法を提案する必要がある。

人の生活する空間にあふれる道具は、拘束条件を利用したものが数多く存在する。直線を引くときや真直ぐに物を切るときに使う定規は、ペンやナイフを押さえつけることで

拘束条件をつくり、正確な直線を導くことができる。このような日常で用いる道具の治具の効果ヒューマンインターフェースに取り入れることでシステムの操作性を向上させる研究が行われている [52]-[55]。たとえば、平井らはテレオペレーションによる遠隔操作において、人の操縦動作にロボットが作り出す動作拘束を重ねる「ソフトウェア治具」の提案をし、その有効性を示している [52]。神徳らは、バイラテラルマスタ・スレーブテレオペレーションにおいて、ロボットと環境との接触に拘束力を与えることで遠隔操作システムの操作性を改善する手法を提案している [53]。Lynch らは、人のマニピュレーション作業に目的位置までの軌道をあらかじめ設定し、その軌道に拘束する Motion guide を用いることで対象物の操作が容易になることを指摘している [54]。Tickel らは、人にとって自然で扱いやすい「拘束」を設計するため、ガイドレールを使ったマニピュレーション作業に人が扱う力の解析を行っている [55]。このような拘束条件による軌道の生成は、レールの拘束を有した窓や机の引出しの開閉、回転中心が固定されたドアやクランク操作、自転車のペダルなど様々なものがある。しかし、これらの例では、固定された動作を行うに過ぎない。未知環境の任意の場所へ移動するためには、拘束条件を与える利点と可操作性を兼ね備えた動きが望まれる。ここで、日常での物の運搬を考えてみると、人は車輪を備えた道具を用いて対象物を運搬することがある。たとえば、建築現場で使われる猫車やリアカー、さらにはショッピングカート、ベビーカー、自転車、一輪車など、人が利用する形態は様々である。これらの運動は車輪の向いた方向へ限定され、車軸の方向へは車輪の摩擦を超える力を加えない限り動かすことはできない。しかし、車輪の動きは運動の制限に関わらず、任意の目標位置・姿勢に移動することが可能である。このような車輪の拘束条件は非ホロミック拘束という幾何学的条件で表すことができる。非ホロミック拘束を有したロボットの制御は難しく様々な軌道計画手法が提案されている [56]-[66]。しかし、人は日常の経験からこのような車輪の拘束を有する道具の操作を行うことができる。これは、重量物を少ない力で移動できる車輪の機能と拘束条件を理解し目的位置まで動作計画する人の技能を組み合わせ、人と道具の関係の好例である。荒井は、非ホロミックの特性を利用したヒューマンインターフェースとして、宇宙ロボットなどの複雑な非ホロミック系を単車輪の単純な非ホロミック系へ置き換えることで操作性を向上させる手法を提案し、有効性を主張している [67]。

以上の現状認識を踏まえて、本研究では、人と同等の機能を持たせるよりも、単純な道具として使いこなすことのできるロボットの制御系を構築し、人との協調行動を実現することを検討する。具体的に本論文では、単車輪の非ホロミック拘束条件を人と協調するロボットに導入することで、動きを単純化させ、人にとって理解しやすく、扱いやすい動作にする手法を提案する。次節では、これまで行われてきた人とロボットによる協調運搬の研究について概説し、どのような問題が解決されていないか明らかにする。

1.2 従来の研究

人とロボットが互いに離れた場所を把持し、協調して重量物や大型物体の運搬をする手法は、ロボットに対し操作者が直接力を伝えることができず、対象物を通してロボット側に力を加えるため、ロボットが対象物に加える力と人の操作力をそれぞれ別々に計測することができない。したがって、人の操作力を増幅するパワーアシスト装置を単純に拡張して人とロボットの協調運搬に適用できない。

現在、人とロボットが協調して単一物体を持ち運ぶ技術は、インピーダンス制御を利用

した手法が主流となっている。インピーダンス制御は、はじめに、複数ロボット同士が単一物体を運搬する問題に応用され、その有効性が示された [69]-[75]。このインピーダンス制御を利用したロボット同士の協調運搬をさらに応用し、ロボットが対象物の重力成分を支えている状態に人が力を加えることで、ロボットは対象物を通じて人の操作力を外力として受け取り、その力に対しある代表点に設定したインピーダンスを満たすように駆動する協調運搬手法が考えだされた [19, 20, 23, 29]。しかし、このような制御系を構成する場合、ほとんどは物体の大きさや質量、各ロボットの把持点の位置及び姿勢の幾何学的関係が既知であるという仮定を必要とする。また、これらの条件がそろっていたとしても、ロボットの力センサからインピーダンス制御される代表点までの距離が離れると、力の変換においてセンサのノイズが拡大され制御が不安定になる問題が考えられる。

そこで、対象物の寸法が既知でなくとも、安定したインピーダンス制御が行えるような手法が検討された。小菅らは、人と複数ロボットが協調して長尺物や大きな物体を操ることができるように、各ロボットの把持点周りにインピーダンス制御をすることで対象物のある点に並進と回転の見かけのインピーダンスを持たせる手法を提案している [21]。平田らは、小型の複数台の移動ロボットに対象物を把持させ、各ロボットに制御によるキャスターアクションを実現することで、未知物体を人と協調運搬する手法を提案している [39, 47]。双方の提案手法共に、複数台のロボットが幾何学的関係を必要とせずに力制御のみで、人との協調行動をすることができる。しかし、これらの方法では、重力方向の力をロボットが支えることが前提となっているので、対象物の質量を事前に知っておく必要がある。また、等方的なインピーダンス制御を基本とした制御手法であるので、ロボットに対し人の操作力が十分に伝えることができるという前提で成り立っている。前節でも述べたように、長尺物や大型物体を協調して把持する場合、力を十分に伝えることのできない状況が考えられる。このとき、対象物の思いもよらない挙動や過大な操作力の要求により、対象物をうまく扱うことができない場合が想像される。積際ら [46] は、これらの挙動を防ぎ、人の意図どおりに対象物の回転と並進を分ける方法を提案しているが、対象物の寸法や重量が既知という条件が必要となる。

もし、力が十分に伝えられる状態であっても、対象物のサイズや重さに起因して操作感覚が変化するため、いろいろな問題が残されている。そこで、人との協調運搬をスムーズに行うため、インピーダンスパラメータを調整する手法が研究されている。Omar らはロボットと人の負荷を分散するシステムにおいて、コンプライアンスを可変にすることで持ち上げ作業の安定性が改善されることを報告している [24]。また、人の筋力モデルを見ても判るように、人の操作力は常に一定のインピーダンスを実現しているわけではない。そこで、人の協調運搬作業特性を解析し、人とロボットの協調運搬制御則を導出しようという試みがされている。Rahman らは、人の腕の動作モデルを参考にロボットのインピーダンスモデルを可変にすることで柔軟な移動ができることを提案している [33]。池浦らは、対象物を協調して持ち上げるときのタイミングに注目し、人同士の鉛直持ち上げ作業から抽出した動作タイミングや力特性をロボットに導入することで違和感のない協調持ち上げ作業が実現されることを報告している [28, 31]。また、積際ら [42] は、人と協調作業を行うロボットの制御において、作業過程の途中でインピーダンスを可変させることにより、円滑な協調が行われることを示し、そのときの対象物の軌跡が躍度最小軌道 [68] を描くことを報告している。また、前田らは、実時間で人の挙動を予測し、インピーダンス制御の弾性係数を利用して推定軌道に追従させる手法を提案している [41]。これらの研究は、人のモデルに沿った手法であるため、操作感の向上やエネルギー授受が最小になるなど、人

との協調運搬がスムーズになると報告している。しかし、実験の状況を見る限り、人の腕の届く狭い領域に限った対象物の扱いであり、限定された条件での検証しか行われていない。人の重量物の運搬は腕の届く範囲に限らず、長い距離を移動する場合がある。そのとき人がとる行動は、腕の力が十分出せる姿勢をなるべく維持し、移動は主に足の動作で行う。そのため、長距離の移動まで考えた場合、操作感の評価は全身の動作を考慮する必要が生じ困難なものと想像される。

一方、対象物の挙動に拘束条件を与えることで、ロボットとの協調を容易にする手法が提案されている。林原ら [37] は、鉛直平面内における人同士の協調運搬挙動の計測結果に基づき、水平方向の制御則は通常のインピーダンス制御を用い、鉛直方向は対象物の傾きを水平に保つようにマニピュレータを上下移動させる手法を提案している。提案する制御則は対象物のパラメータに関係しないため、重量や寸法が未知の対象物であっても用いることが可能であり、人との協調行動もスムーズに行えることが報告されている。小菅らも、対象物を水平に保つ持ち上げ動作を提案し、制御の安定性について述べ、対象物の大きさによらずに有効な手段であることを主張している [32]。しかし、対象物を水平に保つという拘束条件は、姿勢を任意に傾けることができない欠点を持つ。そこで林原らは、さらに人同士の協調運搬の計測を行い、人の把持点に加えられたトルク操作により生じる並進力の低周波成分を利用し、ロボットが維持すべき参照角度を変更する手法を提案している [38]。しかし、この手法を用いるときの条件として対象物の重量が既知であるという条件が加わることになる。水平面内の対象物の運搬では、前節で紹介した Lynch らが提案する Motion guide を用いた手法や平田らが提案する地図情報を利用する協調運搬 [44] が提案されている。これらの手法は、目的位置まであらかじめ設定された経路に対象物の軌道を拘束することで人との協調運搬を容易にする。しかし、対象物の軌道の変更や経路の選択をすることができず、既知の環境で扱う場合のみ有効である。

作業範囲の広い実用性のあるロボットとして、Peshkin らは、Cobot と呼ばれる台車型のロボットシステムを開発し、人との重量物の運搬に利用することを提案している [76]。また、Khatib らは、マニピュレータの持つ 3 次元空間の作業能力を広い範囲で適用することのできる移動マニピュレータを用い、対象物の代表点や人の慣性特性、把持特性が既知であるという前提のもと、人と協調して単一物体を操る制御系の提案をしている [35]。さらに、横井らは、提案する動的協調制御法を使って、人と移動マニピュレータによる協調運搬を実現している [27]。しかし、移動台車が動くことのできる水平面内や通常のインピーダンス制御を基本とした手法で限られた方向の移動のみ取り扱い、移動マニピュレータの特徴である 3 次元空間内の広い作業領域を使った具体的作業が示されていない。

以上のように、これまでの研究は、対象物の状態が既知であることや、操作者がロボットに対し十分な操作力を与えることができるというどちらかの条件を必要とする場合が多い。また、運搬する対象を実際にどの程度の場所へ持ち運べるか示した研究は行われていない。人と協調運搬を行う装置を実用するためには、3次元空間内の任意の位置・姿勢へ対象物を運搬可能にすることが必要である。その手法は、操作者にとって判りやすい挙動をし、どのような対象物であっても扱える柔軟性をもった手法であることが重要と考える。

1.3 研究の目的

本研究では前節までに述べた現状認識に基づき、人と協調して物を運搬し操作者の負担を軽減することができるアシスト装置に、単車輪を模倣した仮想的な非ホロミック拘束を与える手法を提案し、その効果を確認することを目的とする。

対象物の運搬には(a)「接近」してから(b)「把持」し、(c)「移動」という行動をとることになるが、本研究では(a),(b)はすでに行われていると仮定し、(c)の移動に関してのみ議論するものとする。このとき、できるだけ簡潔なシステム構成による協調運搬を実現するために、ロボットアーム先端の力センサおよびアーム関節角の情報のみを用いて制御則を構築する。人の意図の理解や作業計画のための知能的な処理を避け、また画像処理や音声認識などのための複雑なシステムを必要とする視覚情報や聴覚情報は利用せず、人が対象物に加えた力に応じてロボットがその運搬を補助するシステムを開発する。人による補助と同等な自律性を持たせることよりも、人が道具として使いこなすことができるロボットを目指す。

本論文では、最小限の設備で協調運搬することを考え、人とロボットが一对一で対象物に向い合って把持し協調運搬する場合を考える。このときの対象物を一人では把持することが難しい長尺物に話題を絞って議論していく。ここで、長尺物と大型物体はロボットの把持点と人の把持点との距離に関係した問題として扱うことで、操作者とロボットの把持点間距離が離れる観点から同一の問題と考えられることを先に述べておく。対象物がある初期位置から目的位置まで運搬することを考え、次の3項目をメインテーマとして検討を進めていく。(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」。以下に詳細を説明する。

まず(1)では、水平面内の協調運搬のアプローチとして、単車輪の拘束と同様の非ホロミック拘束をロボットの把持部に与え、人とロボットとの協調運搬を日常で用いることの多い車輪を備えた道具と同様に扱えるようにすることで、人との協調運搬を容易にすることを目的とする。対象物の挙動を制限することで、人が加えた力と対象物の運動の関係を単純化する。一方、その条件が対象物の任意の目的位置・姿勢に運搬するという、作業本来の目的を損なわないことが重要である。そこで、提案する非ホロミック拘束が水平面内の挙動において、可制御性を維持することを明確にし、それを実現するための制御手法を提案する。最終的に、拘束条件のない場合の協調運搬と比較し、提案手法の効果を評価、検討することを目的とする。

(2)では、3次元空間内の協調運搬のアプローチとして、(1)で提案した非ホロミック拘束の動きを利用する協調運搬手法を拡張し、3次元空間での協調運搬を実現することを目的とする。3次元空間内に作業領域を拡張するにあたり、人が操作方法を容易に想像できる、かつ、空間内の可制御性を維持することが重要である。非ホロミック拘束をロボットの動きに与える手法は、3次元空間内の可制御性を保ち、人はその動きを理解し目的地までの経路を自ら組み立て、運搬を実現できると考えた。はじめに、鉛直平面内のロボットの動きへ非ホロミック拘束を与え、人がその動きを理解し対象物の運搬が行えることを明らかにする。次に、水平面内と鉛直平面内の動きを組み合わせ、3次元空間内の仮想非ホロミック拘束を用いた協調運搬手法を検討する。最後に、人は水平面内の協調運搬手法を応用することで、3次元空間内の対象物の位置決めが行えることを示し、提案手法の有効性を確認する。

(3)では、(1)、(2)で提案する非ホロミック拘束を用いた協調運搬手法の汎用

性を明確にすることを目的とする。アシスト装置の実用を考えた場合、ロボットには広域の作業領域が望まれる。従来ある荷車などの受動的な道具に重量物の運搬を補助するためのモータを取り入れただけでは、移動台車の動くことのできる範囲に限られる。しかし、我々が日常生活で物を持ち運ぶ目的位置は、床面上に限らず机の上や棚などの移動台車には障害物となるような場所へ持ち運ぶ場合がある。3次元空間内の任意の場所へ物を運ぶことを考えたとき、移動台車の自由度が使えない場合でもさらに6自由度の可制御性を保つ必要がある。その解決策の一つとして、6自由度のマニピュレータを移動台車に搭載する移動マニピュレータを用いることを考える。移動マニピュレータは、移動台車が進入できない場所や移動台車だけでは持ち運ぶことのできない机の上などに、空間内の6自由度の可制御性を維持して運搬をすることができる。そこで、作業領域の広く取れる移動マニピュレータに、(1)、(2)で提案した制御手法を用いることで、より一般的な状況での協調運搬を考える。提案する非ホロノミック拘束を使った協調運搬手法を実用するためのシステム構成や制御手法について検討を行い、移動機構を備えたロボットにおいても、提案する手法が有効に機能することを確認する。

1.4 本論文の構成

本論文の第2章以降の構成は以下のとおりである。

第2章では、水平面内の物体の協調運搬制御手法について検討する。はじめに、等方的なインピーダンス制御を用いた協調運搬で想像される弊害を回避するための手法として、非ホロノミック拘束条件を与える協調運搬手法を提案し、その利点を述べる。次に、提案手法の水平面内における可制御性について証明を行い、協調運搬手法としての機能を損なわずに、拘束条件による操作感覚の向上が望めることを示す。提案手法を実機に導入するために、まず、等方的なインピーダンス制御を使った長尺物の運搬を考えたときの問題を明確にし、従来型のインピーダンス制御による拘束方法を述べる。そして、従来型の拘束条件の問題を指摘し、その解決手法として本論文で提案する仮想非ホロノミック拘束による協調運搬手法をインピーダンス制御により実現する方法を解説する。最終的な評価をするために、人とロボットによる協調運搬実験を行い、拘束条件のない等方的なインピーダンス制御と比較することで、提案手法の有効性を確認する。

第3章では、人とロボットによる3次元空間内の協調運搬手法について検討する。実用を考えた対象物の協調運搬には、3次元空間内の任意の位置・姿勢へ運搬できることが望まれる。また、その操作方法が人の容易に扱うことのできる手法であることが望まれる。この点を踏まえ第3章では、第2章で提案した非ホロノミック拘束を用いた人とロボットによる協調運搬手法を、3次元空間内の協調運搬へ拡張することを提案する。まず、3次元空間内の協調運搬を水平面の挙動と鉛直平面の挙動の2つに分けて考え、鉛直平面内の協調運搬をはじめに考える。ここで、鉛直平面内のロボットの挙動に、水平面内のロボットの動きに与えた仮想非ホロノミック拘束と同様の拘束を適用することで、対象物の昇降を行う手法を提案する。対象物は鉛直平面内で単車輪と同様の動きをするため、操作者は水平面内での台車の扱いと同様に繰り返し操作を行い、目標の位置・姿勢へ協調運搬することができる。人は単車輪のような非ホロノミック系を扱う能力を一般に有していると考え、仮想非ホロノミック拘束を用いた協調運搬手法は鉛直平面内においても有効な手段であることを人とロボットの協調運搬実験により検証する。また、対象物の重量が未知であっても、拘束条件を与えられた方向の重量成分は人とロボットで分担されることを示

し、協調運搬におけるロボットが支える対象物の重量補助について述べる。この結果を踏まえて、水平面内と鉛直平面内の協調運搬を組み合わせる手法を提案し、提案手法の3次元空間内の可制御性について証明する。最後に、実際のロボットへ提案する制御則を組み込み、人とロボットによる協調運搬実験によりその有効性を示す。

第4章では、第2章、第3章で提案した人とロボットによる協調運搬制御手法を作業範囲の広い移動ロボットに導入する方法を考える。まず、水平面内を移動することができる移動台車を考え、仮想非ホロノミック拘束を使った協調運搬手法の導入を検討する。移動台車の種類を通常車輪の機構で動く非ホロノミック移動台車と複雑な機構を持つが全方向へ移動することのできる全方向移動台車に分けて考え、それぞれの機構に対して仮想非ホロノミック拘束を実現する手法について述べる。次に、移動台車だけでは運ぶことのできない3次元空間内の目標位置へ協調運搬を実現するために、移動マニピュレータを用いることを考え、第3章で提案した3次元空間内の仮想非ホロノミック拘束を用いた協調運搬手法の導入を検討する。移動マニピュレータの制御は、対象物が重い場合に有効である「移動台車主体の制御」と対象物が軽量の場合に有効である「マニピュレータ主体の制御」の2つのアプローチを考える。そして、それぞれの制御方式を実現するための移動台車とマニピュレータの協調制御手法を提案する。人と移動マニピュレータによる協調運搬実験により、提案する制御手法が、システム全体の冗長自由度を使い、仮想非ホロノミック拘束を維持しながら対象物の運搬を行えることを示す。また、固定型のマニピュレータや移動台車のみでは実現することのできなかつた広域の作業領域で、3次元空間内の具体的な目的位置へ対象物を運搬可能であることを示し、人と協調運搬を行う装置として移動マニピュレータを導入することの有効性を示す。

最後に、第5章において本研究の成果を総括し、今後の発展について述べる。

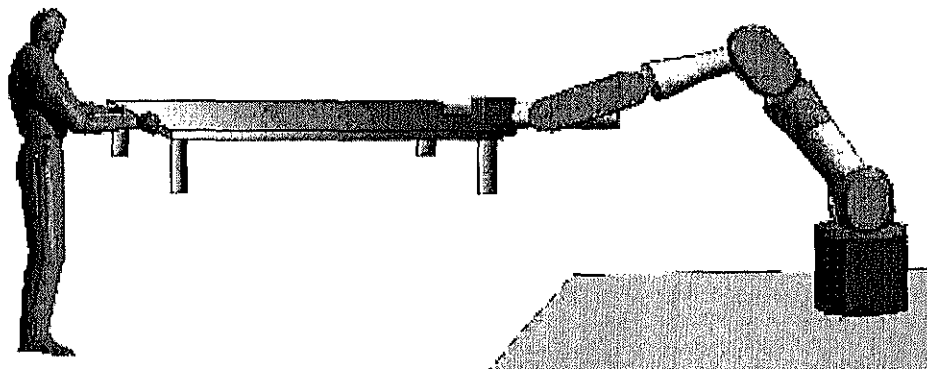


Figure 1.1: Human-robot cooperative manipulation.

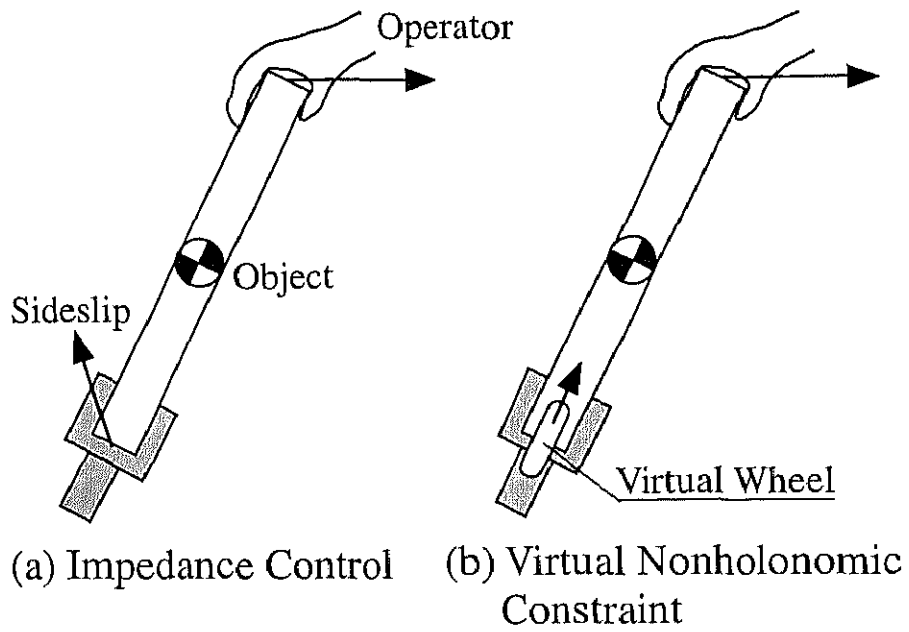


Figure 1.2: Cooperative manipulation of long object.