

第2章 長尺物の水平面内の協調運搬

2.1 緒言

本章では、第1章「本論文の目的」で述べた(1)「水平面内の協調運搬」に話題を絞り、その手法について述べる。対象物は独りでは持ち運ぶことの困難な長尺物とし、人とロボットが1対1で長尺物の端点を向い合うように把持し協調して目的位置まで運搬することを考える。

人とロボットが協調して作業を行うシステムは、人や環境の特性がわからないことが多く、ロボットと人、環境に対する相互干渉を考慮した制御系を構成することは非常に難しいとされてきた。この問題に対し、ロボットの各関節のアクチュエータを制御することで見かけの特性を望ましい値にするインピーダンス制御により、人との協調作業を行う方法が提案されている。人とロボットが対象物を直接把持する運搬方法のとき、人が加える力は対象物を介してロボットの手先に伝わることになる。インピーダンス制御を用いた場合、このロボットの手先で計測された力に倣うように受動的な動きをさせることで、人との協調運搬を実現する。このときインピーダンス中心を設ける場所は、一般的に協調運搬する対象物が未知であるため、任意の場所に設定することは難しい。そこで、制御する点が一意に定まり、かつ、協調して行動することになる人にとって判りやすい場所にインピーダンス中心を定める必要がある。また、力を計測するセンサから離れた場所にインピーダンス中心を設けることは制御に大きなゲインを与えることになり、外乱やモデル誤差を増幅してしまい制御が不安定になることも考えられる。そこで、インピーダンス制御する代表点をロボットが対象物を把持する点、つまり、ロボットのエンドエフェクタ部に設けることを考える。

従来の等方的なインピーダンス制御では、操作者の加える力がロボットの力センサに意図した方向へ正確に伝えられる場合は、望む特性を容易に実現することができる。しかし、長尺物の端点同士を把持した場合、人が力を加える場所とそれを計測するロボットのセンサまでの距離が離れるため、操作力をうまく伝えることができない。対象物の特性が既知であるとき、慣性の影響を打ち消す制御をすることで操作感の良い制御が実現できると考えられるが、実用を考えた場合、対象物の特性が既知である可能性は少ない。また、外乱に対しての保証が無く、対象物に未知の力が加わったときには思いもしない挙動をする危険性も考えられる。これらを、本論文では全方向へ動けることによる弊害と考えた。実生活でもそのような例は存在する。たとえば、ショッピングカート等に見られる全方向へ移動することのできる、キャスター機構を備えた台車の操作を考えてみる。普段これらの道具を使っていて、全方向へ移動できる便利さとは別に、扱い難いと感じる場面に遭遇したことはないだろうか。コーナーを曲がる時や方向転換するとき、なかなか進行方向を変えることができずに、ずるずると横滑りしてしまう感覚である。Fig.2.1左に示すような右方向へコーナリングする場面では、はじめに進んでいた進行方向へ台車全体の慣性力が残り横滑りしてしまうため、思い描いていた軌道から大きくはずれ、思いもよらない

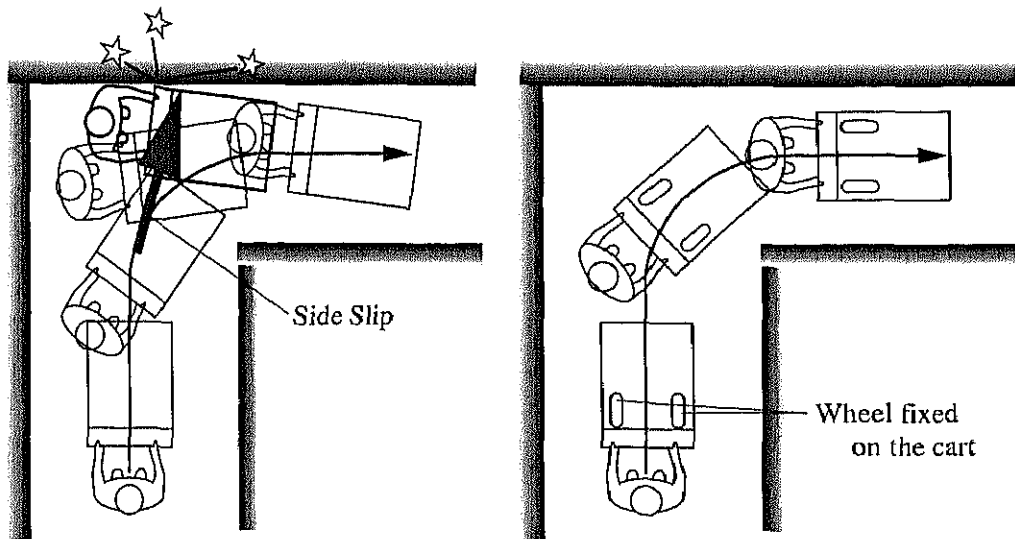


Figure 2.1: Example of cornering.

挙動から衝突の危険を感じた経験が筆者以外にも1度はあるのではないだろうか。このような横滑りの挙動は高速でコーナーを曲がろうとするほど激しくなる。操作者は横滑りの挙動を抑える力を加えなくてはならず、そのとき用いる操作はとても扱い難く、煩わしい。長尺物や大きな物体をインピーダンス制御で協調運搬する場合も同様の問題が発生する。もしここで、前輪、もしくは、後輪に車体の一定方向へ固定された車輪が備わっていた場合はどうだろうか。横滑りの慣性力は車輪の拘束方向で抑えることができ、車体を操舵することで容易にコーナリングを行うことができる (Fig.2.1 右)。そこで、このような固定車輪機能を満たす非ホロノミック拘束をロボットの動きに与えることで、操作性悪化の原因となる対象物の横滑りを防ぎ、ロボットとの協調運搬を容易にすることができるのではないかと考える。拘束条件のない場所へ仮想的に車輪と同様の拘束条件を与える、仮想非ホロノミック拘束を用いた協調運搬手法を提案し、それを実現するための制御手法を解説する。提案手法の有効性を確認するために、人とロボットによる協調運搬実験により、その効果を評価・検討する。

2.2 仮想非ホロノミック拘束の導入

人が重量物を運ぶときに使う車輪のついた道具の歴史は古く、紀元前3000年ごろに馬を利用した荷車として登場し、以来、様々な改良を経て現在の自動車やバイクとなり、交通や運搬の主役を担っている。また、動力を利用しない受動的な車輪を有した道具も現代社会に欠かせない存在となっている。Fig.2.2 に荷車を利用した重量物の運搬例を示す。建築現場で使われる猫車やリアカーは方向の固定された車輪を備え、その運動は車輪の向いた方向へ限定される。しかし、これらの道具の動きは運動の制限に関わらず、平面内の任意の目標位置・姿勢へ運搬することが可能である。このような車輪の拘束条件を備えた動きは非ホロノミック拘束と呼ばれる。非ホロノミックな拘束の例としては、車輪を有した移動ロボットをはじめ、水中ロボットや宇宙ロボット、体操ロボットなどがある。これらのロボットを制御するとき、非線形制御理論や非線形力学を考慮した高度な解析が必要となる。しかし、人は車輪のもつ非ホロノミック拘束を有する道具を日常の経験から、

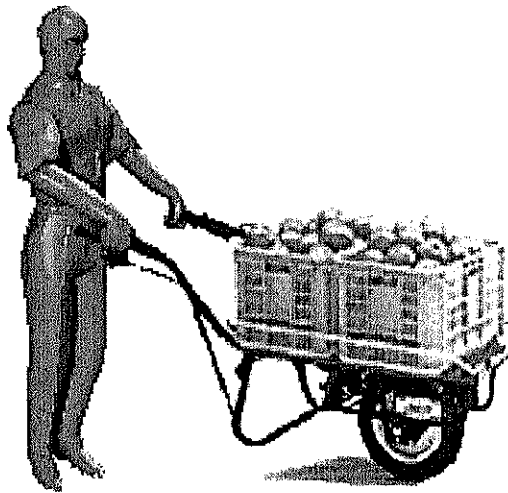


Figure 2.2: Example of tool.

いとも簡単に操作することができる。このような、人の持つスキルを利用することでロボット側に高度な制御を依存することなく、人が目的位置までのパスプランニングをし、ロボットは非ホロノミック拘束による利点を提供することで、人と道具が持つような共存関係を人とロボットの協調動作に適用することができると考えた。

具体的な操作の例を Fig.2.3 に示す。車輪のような拘束条件のある場合、対象物を直接法線方向へ平行移動することはできない。しかし、一旦別の場所へ移動してから方向を切り返して目的の位置へ移動することができる。車の車庫入れなどで同様の操作をした経験より目的位置までの経路計画を容易に組み立てることが可能である。さらに、この例を見ても判るように、動きに拘束条件があっても平面内の自由度に対して可制御性が保たれていることが想像できる。

よって、人とロボットの協調運搬においても、対象物が台車と同様の挙動を行うようにすれば、人は対象物の挙動を直感的に把握できるため、容易に目標の位置・姿勢まで物体を運搬することができる。そこで、対象物のロボット把持点に長軸方向と平行な一輪車に相当する仮想的な非ホロノミック拘束を設定する協調運搬手法を提案する。人とロボットの向い合った長軸方向の動きを自由に操作できるように設定し、人が操作力を与え難い法線方向に対しては拘束条件を与える (Fig.2.4)。すなわち、把持点で発生可能な並進速度ベクトルを長軸方向のみに限定し、姿勢は把持点周りを中心とした回転をさせる。このような拘束条件を与えることで、対象物は法線方向へ移動することができなくなるため、トルクを加えて対象物の法線方向の並進を操作する必要がなくなる。また、対象物の動きは操作者の長軸方向の操作が長軸方向の並進移動、法線方向の操作が回転運動と一意に定まり、扱いやすい並進力のみで対象物を操ることができる。このような単車輪の拘束を仮想的に与える手法を以後、「仮想非ホロノミック拘束」と呼ぶこととする。提案手法による利点は、次の3つにまとめられる。

- 長尺物法線方向に横滑りが生じないため、手押し台車を扱う感覚で直感的に操作が行える。

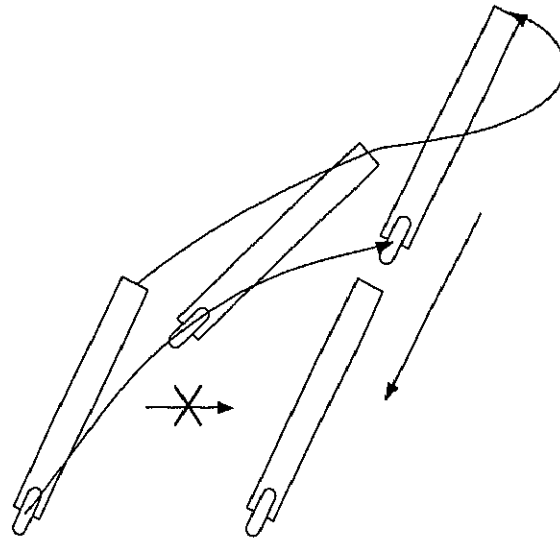


Figure 2.3: Example of transportation.

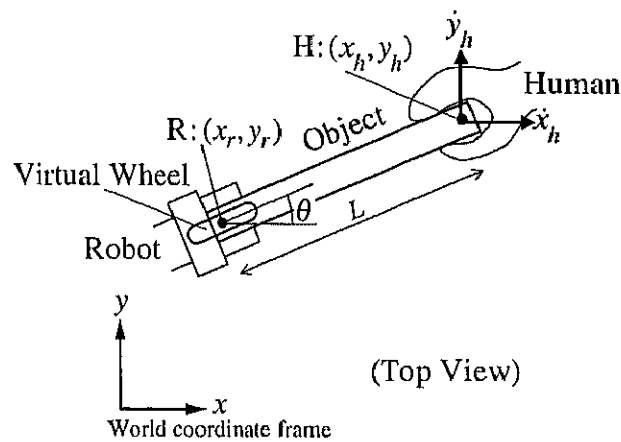


Figure 2.4: Virtual nonholonomic constraint.

- ロボットの位置決めのために対象物にトルクを加える必要がなく、並進力のみを扱えば良い。また、対象物には大きな曲げ応力が加わらない。
- 一輪車と同様の非ホロノミック系であるため、可制御性が成立し、対象物を平面内の任意の位置、姿勢に持っていくことができる。

2.3 可制御性の証明

本節では、提案する単車輪の拘束が対象物を目標位置へ移動させるための自由度を妨げることなく操作可能であることを証明する。Fig.2.4より、絶対座標系における操作者把持点を (x_h, y_h) 、ロボット把持点を (x_r, y_r) 、対象物の姿勢角を θ 、対象物の長さを L とする。ロボット把持点の仮想的な車輪を対象物の長軸方向に並行に設定することを考える。

このとき、車軸方向に横滑りの速度が発生しないという条件は、

$$\dot{x}_r \sin \theta - \dot{y}_r \cos \theta = 0, \quad (2.1)$$

と表される。これが非ホロノミック拘束となる。また、操作者把持点とロボット把持点との幾何学的関係より、次式を得る。

$$\begin{cases} \dot{x}_h = \dot{x}_r - L\dot{\theta} \sin \theta \\ \dot{y}_h = \dot{y}_r + L\dot{\theta} \cos \theta. \end{cases} \quad (2.2)$$

次に、この系の状態方程式を求める。(2.1),(2.2)式より、ロボット把持点の並進速度および対象物の角速度は、

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \\ -\frac{\sin \theta}{L} & \frac{\cos \theta}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_h \\ \dot{y}_h \end{pmatrix} \\ &= \mathbf{g}_1 \dot{x}_h + \mathbf{g}_2 \dot{y}_h, \end{aligned} \quad (2.3)$$

と表される。これは状態変数を対象物の位置・姿勢、入力を操作者把持点の並進速度とする、ドリフト項をもたないアフィン系となっている。

ここで文献[77]を参考に、(2.3)式の系が可制御で任意の状態に到達可能であることを示す。系のベクトル場 $\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2$ から Lie 括弧積を計算すると次式を得る。

$$[\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2] = \frac{\partial \mathbf{g}_2}{\partial \mathbf{q}} \mathbf{g}_1 - \frac{\partial \mathbf{g}_1}{\partial \mathbf{q}} \mathbf{g}_2 = \begin{pmatrix} \frac{\sin \theta}{L} \\ -\frac{\cos \theta}{L} \\ \frac{1}{L^2} \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

次に、 $\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, [\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2]$ からなる accessibility distribution の次元は、

$$\det(\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, [\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2]) = \frac{1}{L^2}, \quad (2.5)$$

より、フルランクであることがいえるので、状態空間の次元と等しく3となる。したがって、(2.3)式の系は Lie 代数階数条件を満たし、可制御である。すなわち、拘束条件を途中で切り替えることなく、対象物は任意の位置・姿勢に到達できる。

2.4 インピーダンス制御による拘束の実現

本節では、提案する仮想非ホロノミック拘束を用いた協調運搬を実現するための制御手法について検討する。

これまで人とロボットによる協調運搬手法として、インピーダンス制御によって対象物およびロボットに仮想的な慣性・粘性を設定する方法が提案されていることは前節までに述べたとおりである。まず、従来の手法を長尺物の協調運搬に適用し、対象物のロボット把持点に仮想的な質量と粘性を設定した場合について検討し、その問題点を探る。そして、明らかとなった問題を解決するために、対象物の挙動を単純化する拘束条件の設定手法を解説する。

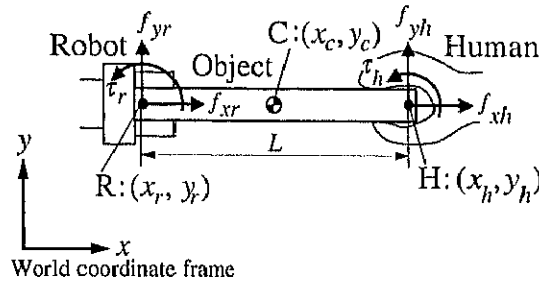


Figure 2.5: Impedance control of long object.

2.4.1 インピーダンス制御における対象物の挙動

はじめに、人とロボットが協調運搬する対象物として Fig. 2.5 のような水平面内における長尺物を考える。対象物の質量を M 、重心周りの慣性モーメントを I 、長さを L とし、絶対座標系における重心位置 (x_c, y_c) は対象物中央にあるとする。対象物の一端 (x_r, y_r) をロボットが把持し、他端 (x_h, y_h) を操作者が把持する。対象物の角度を θ とし、 $\theta = 0$ の状態を考える。操作者が対象物に加える力およびトルクを (f_{xh}, f_{yh}, τ_h) 、ロボットが対象物に加える力およびトルクを (f_{xr}, f_{yr}, τ_r) とする。このとき、重心における力およびトルクの釣り合いより次式を得る。

$$\begin{cases} M\ddot{x}_c = f_{xh} + f_{xr} \\ M\ddot{y}_c = f_{yh} + f_{yr} \\ I\ddot{\theta} = \frac{f_{yh}L}{2} - \frac{f_{yr}L}{2} + \tau_h + \tau_r. \end{cases} \quad (2.6)$$

また、ロボット側には慣性と粘性からなる以下のインピーダンス制御則が設定されているとする。

$$\begin{cases} -f_{xr} = m_x\ddot{x}_r + b_x\dot{x}_r \\ -f_{yr} = m_y\ddot{y}_r + b_y\dot{y}_r \\ -\tau_r = i\ddot{\theta} + c\dot{\theta}. \end{cases} \quad (2.7)$$

m_x, m_y は各軸における仮想慣性係数、 b_x, b_y は仮想粘性係数、 i, c は仮想慣性モーメント、仮想回転粘性係数である。従来は、 $m_x = m_y = m$ 、 $b_x = b_y = b$ として全方向へ均一なパラメータを設定することが多い。ここで、重心位置 C とロボット把持点 R との幾何学的関係を求めると次式を得る。

$$\begin{cases} \ddot{x}_c = \ddot{x}_r - \frac{L}{2}\dot{\theta}^2 \\ \ddot{y}_c = \ddot{y}_r + \frac{L}{2}\ddot{\theta}. \end{cases} \quad (2.8)$$

(2.6), (2.7), (2.8) 式より、対象物の運動方程式は、

$$\begin{cases} f_{xh} = (M + m_x)\ddot{x}_r + b_x\dot{x}_r - \frac{ML\dot{\theta}^2}{2} \\ f_{yh} = (M + m_y)\ddot{y}_r + b_y\dot{y}_r + \frac{ML\ddot{\theta}}{2} \\ \tau_h = (I + i - \frac{ML^2}{4})\ddot{\theta} - (\frac{M}{2} + m_y)L\dot{y}_r + c\dot{\theta} - b_yL\dot{y}_r. \end{cases} \quad (2.9)$$

操作者の作業目標は対象物を目的位置・姿勢に位置決めすることである。(2.9) 式より、人とロボットを結ぶ長軸方向の加速度 \ddot{x}_r と操作力 f_{xh} は一対一で対応しているため、この方向の直進動作は容易である。一方、ロボット把持点の法線方向の加速度 \ddot{y}_r と角加速

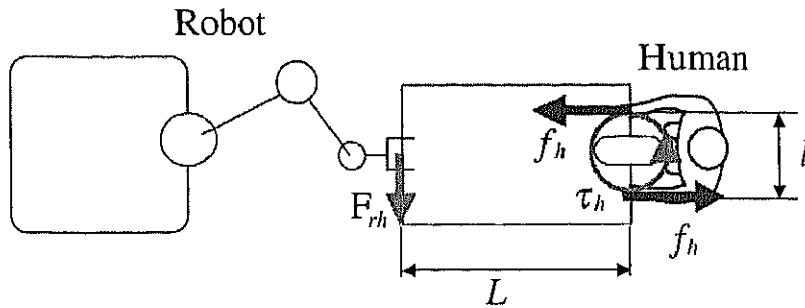


Figure 2.6: Operation by a couple of force.

度 $\ddot{\theta}$ は分離されておらず，互いに干渉し合っている．ここで，対象物を法線方向へ平行移動させることを考えると，対象物の角速度が発生しなければよいので，(2.9)式において $\ddot{\theta} = 0$ ， $\dot{\theta} = 0$ とすると，

$$\begin{cases} f_{xh} = (M + m_x)\ddot{x}_r + b_x\dot{x}_r \\ f_{yh} = (M + m_y)\ddot{y}_r + b_y\dot{y}_r \\ \tau_h = -(\frac{M}{2} + m_y)L\ddot{y}_r - b_yL\dot{y}_r. \end{cases} \quad (2.10)$$

これより，ロボット側を位置決めする際には，対象物を法線方向に平行移動する場合，対象物の長さ按比例した大きな操作トルクを加えることが必要であるとわかる．同様に，ロボット把持点に法線方向の外乱が加わった場合，これを保証するために操作者は大きなトルクを加えなくてはならない．また，大きな曲げ応力を加えることは，変形や破損の原因となる場合がある．さらに，片手で対象物を把持しトルクを加えることは人の握力に依存することになり，この原理から想像されるように長尺物や大型物体になり対象物の重心位置が把持点から離れるにつれて過大な力が求められる．片手での操作で十分なトルクを与えることができないとき，普段我々は，対象物を両手で把持し偶力を発生させることで対象物を回転させる操作を行う．ここで，長尺物の端点に偶力を与えて対象物を操作するモデルを Fig.2.6 のように考える．操作者が対象物端点に偶力 τ_h を発生させるために加える並進力を f_h ，対象物を把持する両手の間隔を l とすると，(2.10)式から法線方向へ並進させるために要求される f_h は次式のように表せられる．

$$\begin{aligned} f_h &= \frac{\tau_h}{l} \\ &= -((\frac{M}{2} + m_y)\ddot{y}_r + b_y\dot{y}_r)\frac{l}{l}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

両手の並進力で偶力を発生させるとき，対象物の移動速度や加速度だけでなく，ロボットと操作者との把持点間の距離 L と操作者が把持する両手の間隔 l の比によって要求される操作力が変化する．長尺物を考える場合，通常 $L \gg l$ であるため，長軸方向の並進操作と比べ大きな力を必要とする．そこで，運搬作業に要求される最大速度，加速度から (2.9)式により要求されるトルクを求めたとき，その値が操作者にとって許容することのできる最大値を超える対象物を本論文中での長尺物や大型物体であると定義することができる．

以上より，長尺物や大型物体の協調運搬を従来のインピーダンス制御で行った場合，対象物の一端で大きなトルクや偶力を要求され操作が困難になる．また，たとえ対象物に大きなトルクを加えられたとしても，曲げ応力を加えることは変形や破損の原因となる恐れがある．このことから，人が主に加えることができるのは並進力であることがいえる．

そこで、扱い難いトルクを用いずに並進力のみを用い、対象物の操作を行った場合について考えてみる。(2.9)式において操作トルク τ_h をゼロとすると、ロボット把持点の法線方向加速度と対象物角加速度の関係は次式のように表される。

$$(I + i - \frac{ML^2}{4})\ddot{\theta} - (\frac{M}{2} + m_y)L\ddot{y}_r + c\dot{\theta} - b_yL\dot{y}_r = 0. \quad (2.12)$$

(2.12)式を(2.9)式に代入し、 \ddot{y}_r と $\ddot{\theta}$ について次式を得る。

$$\ddot{y}_r = \frac{(I + i - \frac{ML^2}{4})f_{yh} - (I + i + \frac{ML^2}{4})b_y\dot{y}_r + \frac{MLc\dot{\theta}}{2}}{(M + m_y)(I + i) + \frac{Mm_yL^2}{4}}, \quad (2.13)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{(\frac{M}{2} + m_y)Lf_{yh} + \frac{MLb_y\dot{y}_r}{2} - (M + m_y)c\dot{\theta}}{(M + m_y)(I + i) + \frac{Mm_yL^2}{4}}. \quad (2.14)$$

操作者が法線方向の力 f_{yh} を加えるとロボット把持点には法線方向の加速度 \ddot{y}_r と対象物の角加速度 $\ddot{\theta}$ が同時に発生する。このロボットの法線方向の加速度は操作者が加えた力とは逆方向へ働くため、操作者はあたかも対象物が横滑りしたように認識する。二次元平面内で対象物を目標位置・姿勢に位置決めするには、対象物の回転と横滑りを1つの入力 f_{yh} のみを使って制御する必要がある。このような動特性を考えての操りは、操作者にとって理解し難いものとする。対象物が一定である時は練習することで動きに慣れることも考えられるが、常に同じ対象の物を運ぶことは考え難い。ロボットの把持点近くに入力された外乱に対しても操作者が保証することは困難になる。

操作者が弱い力を加えただけで対象物が動くようにするには、慣性や粘性のパラメータを小さく設定する必要がある。このとき対象物の挙動は、あたかも無重力空間に浮かんだ物体に力を加えて動かすという、人が日常経験しないものとなり、対象物の挙動が直感的に予想し難い。特に対象物を所望の位置・姿勢で停止させるのは人にとって困難な作業となる。逆に、インピーダンスの粘性を大きくとれば減衰が速くなり、このような挙動は抑えることができる。しかし、粘性は操作力に対して反力となるため、人に加わる負荷が増えてしまう。そこで、インピーダンス係数を小さくしたままで、さらに、非日常的な挙動を避けることができれば、長尺物の操作が容易になると考える。

2.4.2 異方性インピーダンス制御

等方的なインピーダンス制御の場合、どの方向の運動も可能としたために、人がその自由度を使おうとしたときにうまく扱うことができなかつたり、思いもよらない方向へ横滑りが発生したりする。そこで、方向に応じてパラメータが異なる、異方性を持たせたインピーダンス制御を導入することにより、対象物が運動可能な方向を制限し、人が加えた力と対象物の運動の関係を単純化する方法が考えられる。まず、ロボットの手先に設定した仮想インピーダンスに異方性を持たせることにより拘束条件を発生し、運動を特定の方向へ限定することを考える。例えば、インピーダンス制御における(2.7)式の慣性係数、粘性係数をそれぞれ $m_y \gg m_x$, $b_y \gg b_x$ と設定することで、絶対座標系の y 方向には速度、加速度がほとんど発生しなくなるため、運動を x 方向のみに限定することができる。しかし、この場合の拘束は $y = K$ (一定) というホロノミック拘束であり、拘束されている y 座標方向へ移動させることができない。任意の初期位置・姿勢から任意の目標位置・姿勢

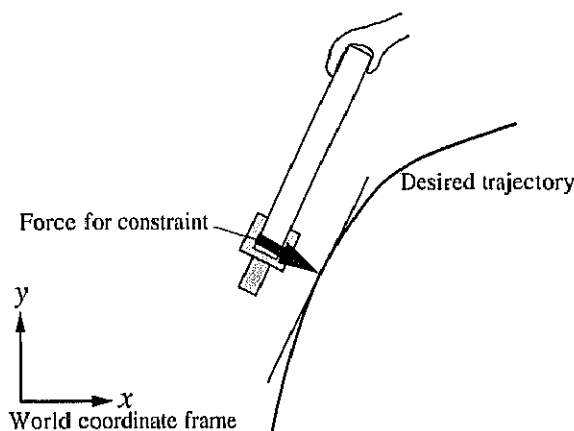


Figure 2.7: Constraint to the desired trajectory.

に到達するためには拘束条件を途中で切り替えるなどの余分な操作が必要となる。環境が既知であったり、目的位置までの軌道が定まっている場合は、 x - y 座標系で表せられる軌道に沿って異方性インピーダンスにより拘束条件を与えれば理想の状態を再現することができる (Fig.2.7)。しかし、そのような状況は限られ、環境の変化に対して柔軟に対応することが難しい。そこで、本論文で提案する仮想非ホロノミック拘束をインピーダンス制御で実現する方法を次節で述べる。

2.4.3 仮想非ホロノミック拘束の実現

2.2 節で述べた仮想非ホロノミック拘束を実現するためのロボットの制御則を考える。ただしロボットアームは手首部に力覚センサを備えているとする。まず、Fig.2.8に示すように人とロボットを結ぶ対象物の長軸方向を X 軸、それと垂直の方向を Y 軸とする手先座標系 X, Y を設定する。ロボットアームはその手先において、対象物をしっかり把持していることを前提とし、運搬中にその把持位置が移動することが無いとする。ロボット把持点 R において、対象物からロボットに加わる力を X 軸方向の力成分 f_{Xr} 、 Y 軸方向の力成分 f_{Yr} 、点 R 周りのトルク成分 τ_r に分解する。(2.1) 式の拘束条件を実現し、制御でロボットアーム手先部に仮想的な非ホロノミック拘束を実現するためには、力 f_{Xr} とトルク τ_r に対してはそれぞれの方向にロボットが抵抗なく運動し、力 f_{Yr} に対してはロボットがその方向に運動を発生しなければ、物体が点 R で長軸方向を向いた車輪によって支えられているのと同じ拘束が生じる。

これにより対象物の点 R は X 軸方向にのみ並進することができる。また点 R 周りの回転も可能である。さらに、 X 軸に接する滑らかな曲線軌道に沿って進みながら進行方向を連続的に変えてゆくこともできる。対象物の挙動は点 R で車輪に支えられている場合と同様になるため、人は台車を操作する場合と同じ技能を用いて、目標の位置・姿勢まで対象物を運搬することができる。

このようなロボットの挙動を得るために、手先座標系の各軸に対して独立した変数を与える異方性を持ったインピーダンス制御を行うことで拘束を発生させる手法を提案する。固定された絶対座標系ではなく対象物と同じ方向を向いた手先座標系において拘束条件を設定するため、対象物の回転にしたがって拘束の方向が変化する (2.1) 式のような拘束

が実現される。

インピーダンス制御するにあたり、対象物長軸方向に関する仮想質量、粘性係数をそれぞれ m_X, b_X 、法線方向に関する仮想質量、粘性係数を m_Y, b_Y とする。また、ロボット把持点周りの仮想慣性モーメント、回転粘性係数を i, c とする。インピーダンス制御則は対象物からロボット手先に加わる力/トルクと手先の運動との関係として以下のように表される。

$$\begin{cases} f_{Xr} = m_X \dot{v}_{Xr} + b_X v_{Xr} \\ f_{Yr} = m_Y \dot{v}_{Yr} + b_Y v_{Yr} \\ \tau_r = i\ddot{\theta} + c\dot{\theta}. \end{cases} \quad (2.15)$$

ここで v_{Xr}, \dot{v}_{Xr} はそれぞれ X 軸方向の速度、加速度、 v_{Yr}, \dot{v}_{Yr} は Y 軸方向の速度、加速度、 $\dot{\theta}, \ddot{\theta}$ は対象物の角速度、角加速度である。

v_{Xr}, v_{Yr} と絶対座標系におけるロボットの把持点の速度 \dot{x}_r, \dot{y}_r との関係は次式のように表せられる。

$$\begin{cases} v_{Xr} = \dot{x}_r \cos \theta + \dot{y}_r \sin \theta \\ v_{Yr} = -\dot{x}_r \sin \theta + \dot{y}_r \cos \theta. \end{cases} \quad (2.16)$$

このとき、 Y 軸方向の速度成分が $v_{Yr} \approx 0$ となれば (2.1) 式とほぼ等価な拘束が生じ、対象物の長軸方向に単車輪と同様な非ホロノミック拘束を実現することができる。

よって、対象物の長軸方向に単車輪と同様な非ホロノミック拘束を実現するには、法線方向のインピーダンスの慣性 m_y 、粘性 b_y を大きくすることにより速度・加速度の発生を抑え、車輪の車軸方向の摩擦を再現する。つまり、(2.15) 式において、予想される法線方向の力 f_{Yr} に対して v_{Yr}, \dot{v}_{Yr} が無視できる程度に小さくなるように m_Y, b_Y を設定すればよい。また、長軸方向の並進と対象物の回転については、自由運動に近いスムーズな動きができるように慣性、粘性をできるだけ小さく設定する。

(2.15) 式よりアーム手先の加速度、角加速度は、

$$\begin{cases} \dot{v}_{Xr} = (f_{Xr} - b_X v_{Xr})/m_X \\ \dot{v}_{Yr} = (f_{Yr} - b_Y v_{Yr})/m_Y \\ \ddot{\theta}_r = (\tau_r - c\dot{\theta})/i. \end{cases} \quad (2.17)$$

上式を積分すればそれぞれアーム先端の目標速度 v_{XrREF}, v_{YrREF} 、目標角速度 $\dot{\theta}_{REF}$ が求められる。これらに関節座標系における各関節の角速度指令に変換し、速度サーボ系に入力すれば、仮想非ホロノミック拘束の制御系が構成できる。この制御則は対象物のパラメータを含まず、質量や寸法などが未知の対象物についても適用が可能である。

2.5 仮想非ホロノミック拘束を用いた協調運搬

本節では、仮想非ホロノミック拘束を用いた協調運搬がどのような状況で用いると有効であるか検討する。

まず、対象物のサイズが小さい物を運搬する場合、人とロボットが向い合った状態で把持していても、ロボットの力センサから人の加える力の作用点は大きく離れることがないので十分な力をロボット側に伝えることができると考えられる。しかし、前節までに述べたように、コーナリングするとき対象物の慣性力の影響により、はじめに進んでいた方向へ横滑りしてしまい、なかなかコーナリングができない場面が想像される。このとき、

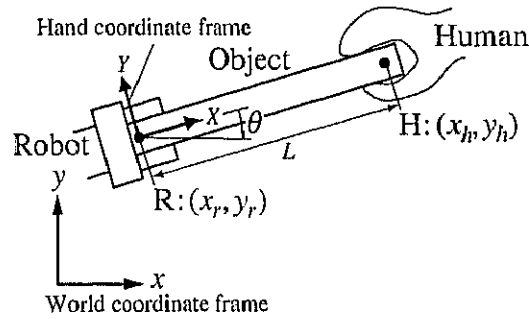


Figure 2.8: Impedance control for virtual constraint.

仮想非ホロノミック拘束を与えることで、対象物の横滑りが抑えられ容易なコーナリングを行うことができる。ここで、車輪の非ホロノミック拘束を与える方向について考えてみる。人はロボットのカセンサに対し十分な力を加えられるので、車輪の方向は人とロボットが向い合った方向である必要はないと考えられる。しかし、人の移動を考えてもわかるように並進移動は前進する動きが基本である。そのため、向い合って対象物を把持した場合、前進方向の移動を基本とした動きが行えるように、向い合った方向へ車輪の進行方向を合わせる方法が良いと考えられる。Fig.2.9(a)に示すように、法線方向へ車輪の進行方向を向け平行移動する方法でも良いと考えられるが、対象物から目をそらして運搬することになり、進行方向の注意と対象物の障害物回避の2つを交互に注意する必要が生じる。人とロボットの向い合った方向に車輪の進行方向があれば、視線の方向に対象物の進行方向と対象物そのものが視野に入り、容易に対象物のナビゲーションと障害物回避を同時に考慮することができる。

次に、ロボットの把持点の位置について検討する。まず、長尺物の両端を把持する方法以外に、Fig.2.9(b)に示すように、対象物の中心を把持させ、長軸方向を向いた車輪の拘束を与える方法も考えられる。対象物の中心付近は重心に近いので、ロボットが対象物の重量全てを支えることが可能である。回転中心が対象物の中央にある場合、対象物の姿勢を変更するとき、回転半径を最も小さくすることができる。しかし、人の把持している場所と反対側の端点も、ロボットが把持した位置を中心とした回転運動をすることから、環境との衝突を十分に注意した運搬が必要になる。また、回転中心が対象物の中心にあると、前後の進行方向にせり出す部分が大きくなるので、壁などの横へ寄せる作業が困難になる。

一方、Fig.2.9(c)に示すように、長尺物の短軸方向を向い合って把持する運搬も考えられる。ロボットの把持点と人の把持点が近づくため、ロボット側へ力を伝えることが容易になる。しかし、このとき問題になるのは、左右にせり出した長尺物の端点を交互に注意しながら対象物を操る必要が生じることである。このような運搬は注意力が散漫になり、安全な運搬は困難であると考えられる。長尺物の長軸方向を向い合って把持する場合、対象物と進行方向が一目で判断することができ、状況判断が容易であり、労力の少ない自然な運搬スタイルであると考えられる。

さらに、実際の作業で有効性が発揮できる場面について考える。まず、長軸方向を向い合って把持した場合、Fig.2.9(d)に示すように、意図した通りに狭い通路を通り抜けることができると考えられる。また、Fig.2.10に示すような壁などの横に位置決めする作業を考えてみる。全方向へ移動することのできる運搬手法の場合、トルク操作による力

の伝達が有効に働かず壁面に横滑りしたまま衝突する場面が想像される。それに対し、端点に非ホロノミック拘束がされた協調運搬の場合、拘束されたロボット把持点を先に壁に寄せ、その後に、ロボット把持点を中心とした回転を行うことで容易に位置決めが行える。双方の作業共に、横滑りによる不審な挙動をしないため正確な対象物のナビゲーションが行えると考えられる。

運搬パートナーが人である場合は、他方の運搬をさほど気にしなくとも目的位置までのパスプランニングや障害物回避などを行ってくれるため、このような道具の運搬のスタイルは当てはまらない。実際、対象物を目的位置まで運搬する場合、長軸方向の運搬のみならず、あらゆる方向へ移動して対象物を操る。しかし、このときのコミュニケーションは力覚だけを用いる方法ではない。力情報のみで相手に法線方向の指示をすることは、前節で述べたとおり困難な操作が要求されるからである。相手の動きが自立的でない場合、一方が主となって目的位置までのナビゲーションを行わなくてはならない。このような動きをさせる場合、お互いに向い合った方向へ運搬する方法が自然であり、かつ、その法線方向へ拘束することで相手に意図した動作を伝えやすくなると考える。

2.6 検証実験

本節では、汎用の多自由度ロボットアームを用いて、水平面内の長尺物の協調運搬実験を行い、通常、の異方性を持たせない等方的なインピーダンス制御で運搬した場合と、提案する仮想非ホロノミック拘束を実現するために異方性を持たせたインピーダンス制御を行った2種類の方法を比較し提案手法の有効性を確認したので、その結果について述べる。

2.6.1 実験装置の構成

実験装置の構成を Fig.2.11 に示す。実験には、3次元空間内で任意の位置と姿勢を実現するため7自由度を有した汎用知能ロボットアーム PA-10（三菱重工製）を用いる。また、それぞれの関節にはアクチュエータ及び関節角度センサが配置されている。通常3次元空間内の位置決めには6自由度あれば位置と姿勢が一意に定まるが、7自由度マニピュレータを使うことで冗長性の問題が発生する。しかし本章では、冗長自由度を利用したマニピュレーションについて議論は行わずに進め、これからの議論は冗長自由度のある無しに関わらず動力化された全てを対象とする一般的な手法であることを述べておく。ロボットの手先には、ロボットが把持した対象物から力を計測する6軸力/トルクセンサ（ニッタ製）を備え、その情報にしたがってアーム全体の関節を制御する。また、力センサの先には対象物を把持するための電動グリップを装着する。制御にはパーソナルコンピュータ（CPU：AMD-K5, 166MHz）を用い、プログラムの開発にはMS-DOSベースのTurboC++を使用した。制御周期の間隔は5msとした。使用するマニピュレータの概観とリンク長を Fig.2.12 に示す。

2.6.2 インピーダンス制御器

実際のロボットを駆動させるときに用いるインピーダンス制御器について簡単に述べる。インピーダンス制御とは、ロボットの手先にバネ、ダンパーなどの機械的要素で構成さ

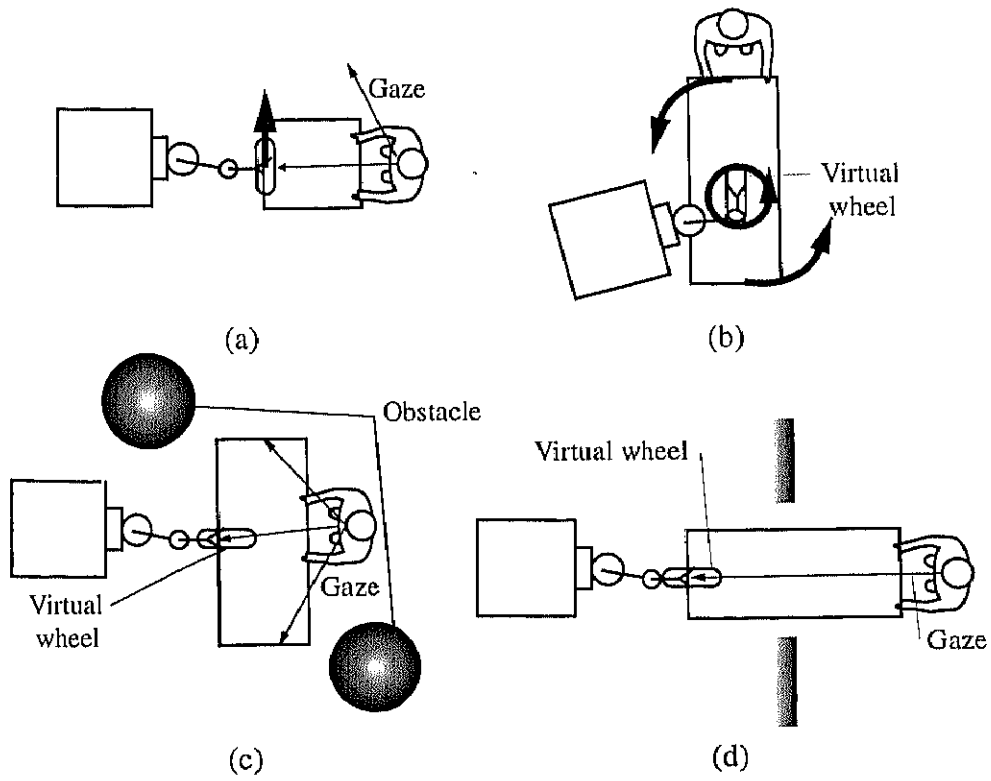


Figure 2.9: Virtual constraint for various cooperation.

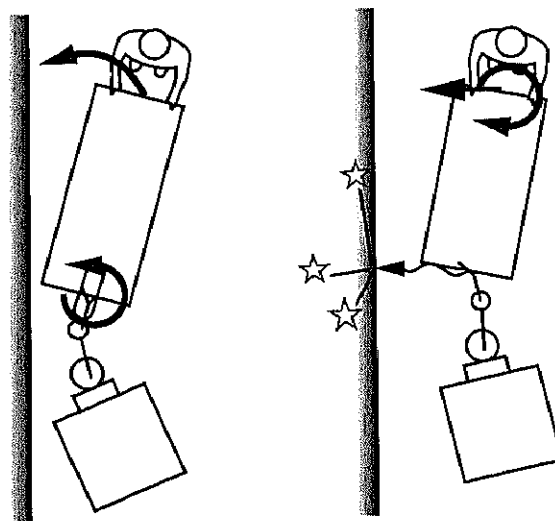


Figure 2.10: Transport to the wall side.

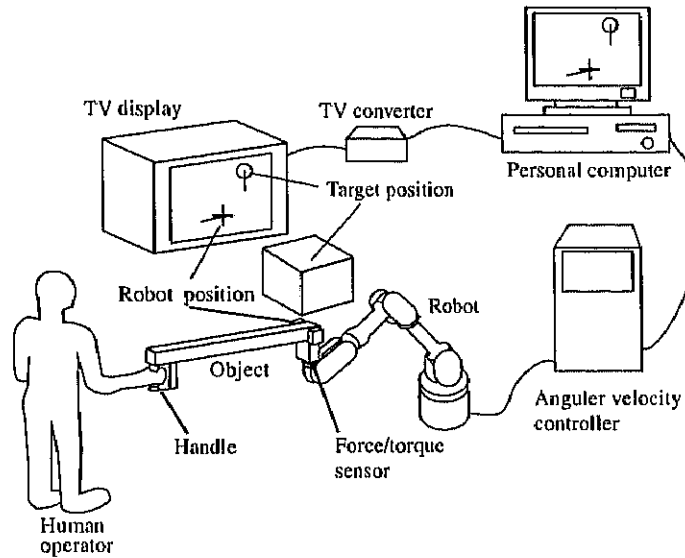


Figure 2.11: Experimental setup.

れたインピーダンスと等価な特性をアクチュエータなどの駆動力を利用して位置，力のフィードバックにより実現する手法である．ロボットの元々持っている機械的慣性モーメント，粘性減衰，弾性をそれぞれ M, D, K とすると，ロボットの駆動力 F と外力 F_d に対する運動方程式は次のようになる．

$$M\ddot{\Theta} + D\dot{\Theta} + K\Theta = F + F_d. \quad (2.18)$$

この系に対して，ロボットの変位，速度，加速度を計測し，駆動力 F をある目標位置 Θ_d に対して

$$F = (M - M_d)\ddot{\Theta} + (D - D_d)\dot{\Theta} + (K - K_d)(\Theta_d - \Theta). \quad (2.19)$$

という値の出力で制御するとき，ロボットアームの挙動は次の運動方程式で表すことができる．

$$M_d\ddot{\Theta} + D_d\dot{\Theta} + K_d(\Theta_d - \Theta) = F_d. \quad (2.20)$$

この系は，あたかも慣性 M_d ，粘性 D_d ，弾性 K_d を持つ系と同様の挙動を示す．(2.19) 式の M_d, D_d, K_d は任意に決める事ができるので，設計者が望む様々なインピーダンス特性をもった系を構成することが可能になる．しかし，(2.19) 式を見ても判るように，ロボットの駆動力を指令する場合，システム特性 M, D, K を知る必要がある．システムの複雑な系はこのような特性を正確に知ることは困難になる．ここで，(2.20) 式の方程式について考える． $\ddot{\Theta}$ についての方程式に変形すると

$$\ddot{\Theta} = M_d^{-1}(K_d(\Theta - \Theta_d) - D_d\dot{\Theta} + F_d). \quad (2.21)$$

この加速度 $\ddot{\Theta}$ は計測値と任意に決めることのできるパラメータから計算できる．制御する対象に加速度もしくは速度サーボ形から構成されている場合，加速度や速度を直接入力することにより，システム特性 M, D, K を知ることなく (2.20) 式の系の特性を得ることができる．

ここで，速度サーボ制御の行えるロボットに対し， 6×1 手先座標系位置・姿勢ベクトル X と 7×1 関節ベクトル Θ として，以下のインピーダンス特性を設定することを考える．

$$F_r = M_d\ddot{X} + D_d\dot{X}. \quad (2.22)$$

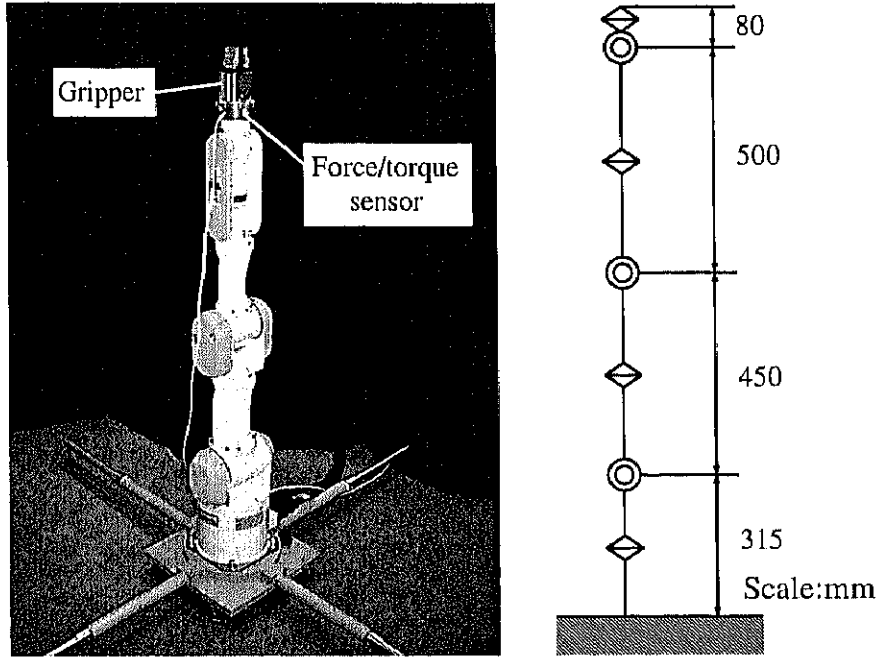


Figure 2.12: Experimental apparatus.

M_d, D_d は仮想インピーダンスの 6×6 慣性行列, 6×6 粘性行列, F_r はロボット手先座標系における 6×1 力/トルクベクトル, \dot{X}, \ddot{X} は手先座標系におけるロボットアームの速度, 加速度を表す. 各行列は正定対角行列とし, 各座標系に対し1自由度系のインピーダンス制御を行う. (2.22) 式のインピーダンス特性をもつための目標加速度 \ddot{X}_d は次式で計算される.

$$\ddot{X}_d = M_d^{-1}(F_r - D_d \dot{X}). \quad (2.23)$$

さらに, この目標加速度を積分して目標速度 \dot{X}_d を求める.

$$\dot{X}_d = \int \ddot{X}_d dt. \quad (2.24)$$

求められた目標速度は手先座標系の速度なので各関節の目標角速度に変換してロボットへ指令する. 手先座標系の速度ベクトルと関節角速度ベクトルは以下の関係式で示される.

$$\dot{X} = J\dot{\Theta}. \quad (2.25)$$

J はヤコビ行列であり, X と Θ の間に $X = f(\Theta)$ の関係があるとき, $J = \partial f(\Theta)/\partial \Theta$ で表せる 6×7 行列である. (2.25) 式の $\dot{\Theta}$ に関する一般解は次式のように与えられる.

$$\dot{\Theta} = J^+ \dot{X} + (I - J^+ J)k. \quad (2.26)$$

J^+ はヤコビ行列 J の疑似逆行列, k は6次元の任意ベクトルである. (2.26) 式の第2項は第1項のマニピュレータ手先座標系の速度指令 \dot{X} に非干渉で各自由度に冗長自由度を利用した速度指令を与えることのできるゼロ空間ベクトルである. 第1項は $\dot{\Theta}$ のノルム $\|\dot{\Theta}\|$ を最小にする解である. 本節では, 冗長自由度の利用を考えず, この第1項のみの速度指令を用いたマニピュレータの制御を考える.

今回使用するマニピュレータは7自由度を有するので、冗長自由度のために(2.26)式の第1項のみで速度指令をした場合、特異姿勢の状態になったとき制御が不安定になることが考えられる。そこで、機構の特異点近傍の不安定な動作を回避するために、妻木らが提案する特異点適合法[78]を用いる。まず、(2.26)式の第1項はCramerの公式から以下のように表される。

$$\begin{aligned}\dot{\Theta} &= J^+ \dot{X} \\ &= \frac{1}{\det J} (\text{adj} J) \dot{X}.\end{aligned}\quad (2.27)$$

ここで、 $\det J$ は J の行列式、 $\text{adj} J$ は J の余因子行列を表す。さらに、 $b = \frac{1}{\det J} \dot{X}$ の単位方向ベクトルを u_d として $\dot{X} = \delta u_d$ とすることで、次式を得る。

$$\dot{\Theta} = \delta b (\text{adj} J) u_d. \quad (2.28)$$

この(2.28)式が特異点適合法を表す式となる。 δ は適当なスカラー値を定めるとする。 $\det J$ は特異点近傍になると値がゼロに近づくことから b は非常に大きな値をとり、過大な速度指令が発生することになる。特異点にマニピュレータが到達したとき、関節角度が求められない原因は分母にある $\det J$ が0となるためである。一方、 $\text{adj} J$ は手先速度座標系における速度指令の方向を決定するための各自由度の速度関係を表し、特異点においても求めることができる。そこで、 b に一定の上限値を定めることで、速度の上限を決定し、特異点近傍においても過度な速度を発生することなく安定に通過することが可能となる。また、特異点通過の際にも u_d により手先の速度指令方向が変化することがないという特徴がある。ただし、この手法では、速度指令として入力した速度と実際に速度サーボ系に出力されロボットが動く手先の速度はベクトルの大きさが異なり、特異点に近づくにつれて速度は小さくなる。そのため、特異点近傍でインピーダンス制御を行った場合、操作者は通常扱う操作力で実現される速度指令よりマニピュレータの動作が遅くなるため、大きな負荷を受けた印象を持つことになる。しかし、人の意図しない方向へ移動することを避け、実現される速度の方向が変更されることなく操れることを優先するために、本手法を導入することにした。

使用するマニピュレータにおける作業範囲内の特異姿勢の回避には(2.28)式を使い解決し、マニピュレータが伸びきってしまう特異姿勢に関してはマニピュレータ先端位置が作業領域の境界に届かないように関節角のリミットを設け、マニピュレータの全ての自由度に対し速度指令をゼロとすることで制御を止めるように設定する。実験では作業領域の境界に届かない範囲で行うようにする。

以上により、ロボットに指令する目標関節角速度が計算でき、速度サーボ系に入力することでマニピュレータ手先座標に望んだインピーダンス特性を実現することができる。

2.6.3 水平面内の協調運搬実験

前節までに述べた実験装置と制御手法を用いて、実際に人と協調して長尺物が運搬できることを確認する。運搬対象としてアルミニウム製の角パイプを用い、一端をロボットに他端を操作者に把持させる。協調運搬実験には、等方的なインピーダンス制御による拘束を与えない場合と、提案する異方性のあるインピーダンス制御で仮想的な非ホロノミック拘束を与えた場合の両方の実験を行い、挙動の比較をする。実験に用いるインピーダンスのパラメータをTable 2.1に示す。仮想非ホロノミック拘束を与える場合には、対象物の法線方向の慣性係数、粘性係数を拘束のない場合のそれぞれ約20倍、250倍とする。

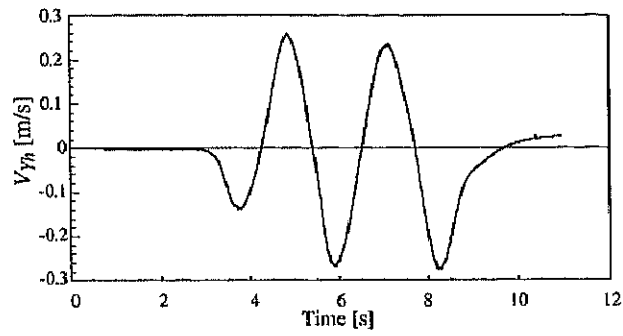
Table 2.1: Impedance parameters for horizontal plane.

	isotropic impedance control	virtual nonholonomic constraint
m_X [kg]	5.5	5.5
b_X [kg/s]	20	20
m_Y [kg]	5.5	100
b_Y [kg/s]	20	5000
i [kg m ²]	5.5	5.5
c [kg m ² /s]	20	20

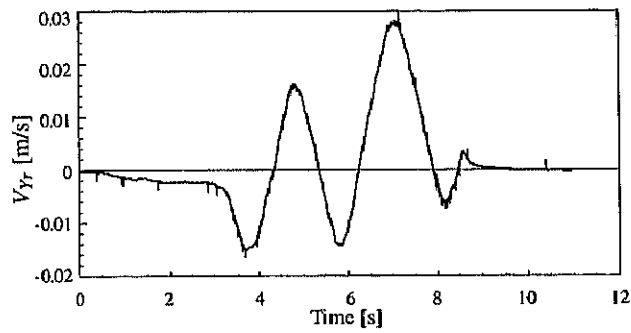
はじめに、前節で提案した異方性を持ったインピーダンス制御により、対象物の横滑りがどのくらい抑えられているか確認するため、並進力のみで対象物を操作する実験を行った。操作者が対象物にトルクを加えられないように、操作者の把持部に自由回転するハンドルを取り付ける。対象物は、長さ75cm、重さ0.7kgのアルミニウム製角パイプを用いる。まず、最初にマニピュレータが位置する場所と絶対座標系が一致しているとし、対象物の長軸は絶対座標系の x 軸と重なった状態であるとする。操作者は対象物の操作者把持点を絶対座標系の x 軸方向に約0.8m引っ張りながら、同じく絶対座標系 y 軸方向に約0.3mの振幅で往復させるスラローム軌道を描きながら搬送することを考える。目標軌道はTVディスプレイ上に表示し、操作者はディスプレイを見ながらこの軌道を習うように把持点を移動させる。操作者把持部およびロボット把持部における対象物法線方向の速度を測定した。比較のため、等方的なインピーダンス制御の実験を行い、その結果をFig.2.13に、仮想非ホロノミック拘束を与えた場合の結果をFig.2.14に示す。Fig.2.13(a)、Fig.2.14(a)より、どちらの場合も操作者手先ではほぼ同じ程度の軌道と法線方向速度が与えられていることが確認できる。またFig.2.13(b)より、等方的なインピーダンス制御では、ロボットの手先で法線方向に横滑りの速度が発生し、横滑りをした軌道で操作者の運搬に追従している状況がみられる。それに対し、Fig.2.14(b)の仮想非ホロノミック拘束を与えた手法では、法線方向の速度はほぼ抑制されている。Fig.2.13(c)、Fig.2.14(c)より、等方的なインピーダンス制御と比べ、仮想非ホロノミック拘束を与えたときのロボット側の搬送軌道は横滑りが抑制されていることが確認できる。よって、異方性を持たせたインピーダンス制御により仮想的な非ホロノミック拘束が実現できていることが確認された。

次に、具体的な目標位置・姿勢に対して協調運搬実験を行う。Fig.2.11のように、操作者はTVディスプレイ上に提示されたマーカーを参照して、対象物を初期位置・姿勢から目標位置・姿勢へ運搬する。ディスプレイ上に”+”で示されたロボットの現在位置を実空間上で半径2.5cmの円に相当する”○”で示した目標位置へ移動させ、同時に、”+”の中心から伸びた線分で示した現在姿勢を同じく”○”の中心から伸びた線分で示した目標姿勢へ $\pm 0.1\text{rad}$ の範囲内に3秒間保持できたときに運搬が完了したとする。被験者には、2種類の動きを十分に練習させ、動きに慣れたところで実験の計測を行う。

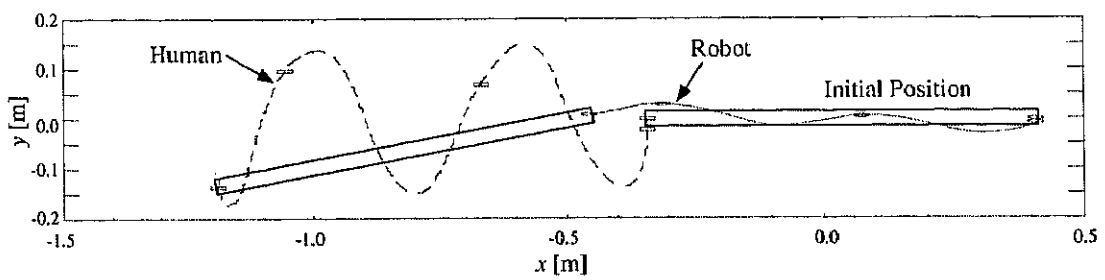
まず、対象物を長さ30cm、重さ0.3kgのアルミニウム製角パイプを用い、操作者は対象物の端点を直接把持し、トルク操作が扱える状況を考える。被験者には、20代の男性3人に同一の条件で実験を行ってもらった。そのうちの一人の結果を示す。等方的なイン



(a) Normal velocity of human.

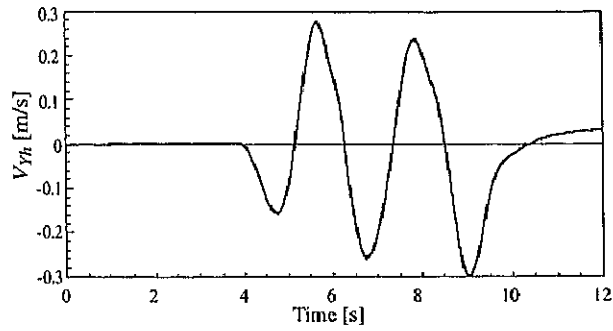


(b) Normal velocity of robot.

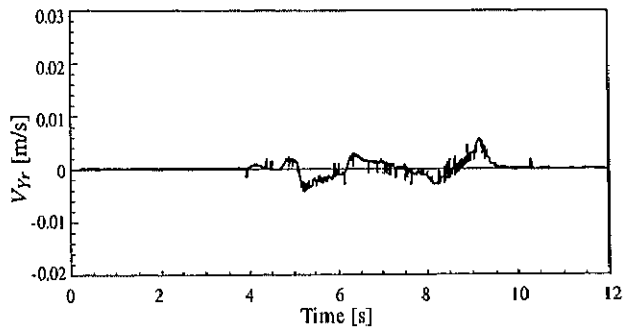


(c) Trajectory.

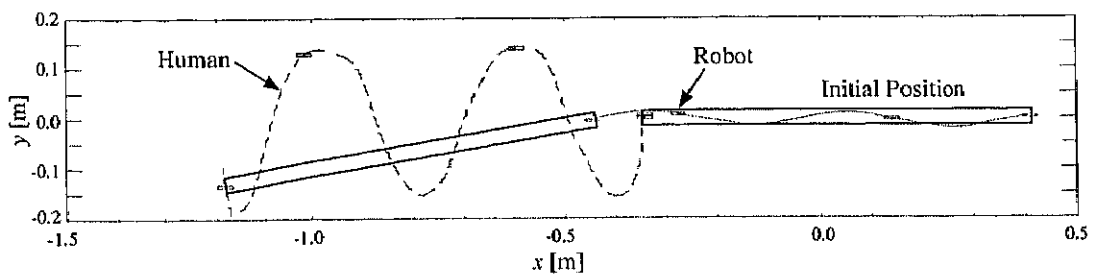
Figure 2.13: Sideslip with isotropic impedance control.



(a) Normal velocity of human.



(b) Normal velocity of robot.



(c) Trajectory.

Figure 2.14: Sideslip with virtual nonholonomic constraint.

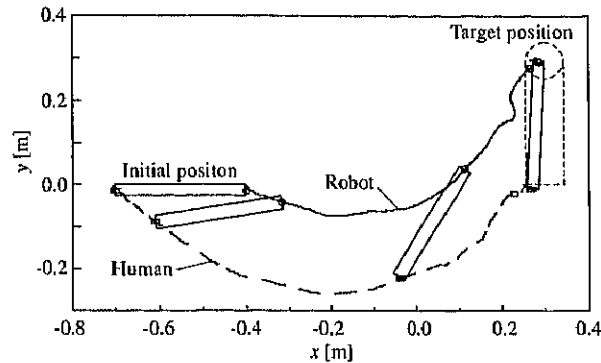


Figure 2.15: Trajectory of object (isotropic impedance control).

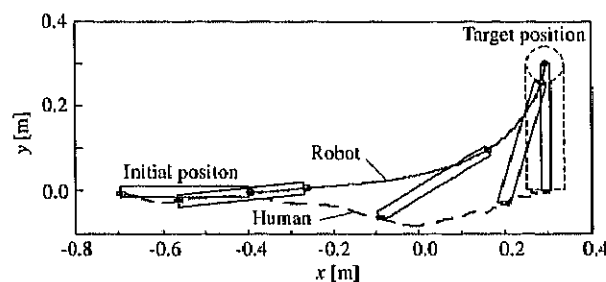


Figure 2.16: Trajectory of object (virtual nonholonomic constraint).

ピーダンス制御を行った場合と仮想非ホロノミック拘束を与えた場合の対象物の運動をそれぞれ、Fig.2.15, Fig.2.16 に示す。搬送の完了時間は等方的なインピーダンス制御の場合 17.58 秒，非ホロノミック拘束を与えた場合 15.84 秒となった。等方的なインピーダンス制御の場合，横滑りのためロボット手先の軌道が揺らぎ，目標位置に正確に位置決めすることは難しい。それに比べて仮想非ホロノミック拘束を与えた場合のロボット手先の軌道は滑らかであり，目標位置・姿勢に到達後も対象物を安定に保持できている。他の 2 人もほぼ同様の運搬挙動を示した。しかし，今回用いた対象物は短く，操作者はトルク操作を容易に扱えることから，大きな差の無い結果になった。これは，(2.9) 式のトルク操作に要求される値に比べ，操作者が十分なトルクを与えることができているためと考えられる。対象物に十分なトルク操作が行えるような場合，拘束条件が操作性の悪化を招くのではないかと心配されたが，本実験における協調運搬では顕著な差は確認されなかった。

実際の運搬作業では，対象物が長くなればなるほどトルクによる操作は難しくなると考えられる。そこで，(2.9) 式で要求されるトルク操作を十分に加えることができないような対象物を用いた協調運搬実験を行うことで前節までに述べた本手法の有効性が明確に現れるか検証する。今回，実験装置の構成上の問題より，実際に大きな物体や長尺物をロボットに把持させることが困難である。しかし，前節の動学的考察をするとき，並進力のみを想定した場合，対象物法線方向へ横滑りすることが確認されている。よって，対象物の長さを極端に大きくすることなく，人為的に対象物へトルクが伝わらないような状況にすることで，長尺物を模擬することを考える。まず，操作者がトルク操作を行えないようにするために，操作者の把持する場所へ自由回転するハンドルを設ける。ハンドルにトルクを加えても対象物に回転力が加わることなく把持部が回転してしまうため，

操作者は並進力のみを用いて対象物を目的の位置まで誘導しなくてはならない。操作者の把持する点でトルク操作が全く行えないので、先に行った条件よりも運搬が厳しくなる。

対象物は、長さ75cm、重さ0.7kgのアルミニウム製角パイプを用いる。被験者は、20代から30代の男性5人とし、同一の条件で実験を行ってもらった。実験前に、被験者に対し2種類の対象物の動きを十分説明した後、練習を行わずに計測に移った。そのうちの一人の結果を示す。拘束条件のないときの対象物の動きを Fig.2.17、仮想非ホロノミック拘束を与えたときの動きを Fig.2.18 に示す。目的位置までの運搬に要した時間は、等方的なインピーダンス制御の場合31.31秒、仮想非ホロノミック拘束を与えた場合17.35秒となった。等方的なインピーダンス制御で協調運搬を行った場合、位置決めには並進力のみで姿勢の回転と長尺物法線方向の横滑りを扱うため、複雑な操作を必要としていることが確認される。対象物の横滑りを抑えるために、操作者は何度も繰り返し操作を行うことで目標位置へと到達している。また、微小な位置を修正して目標位置・姿勢へ正確に対象物を停止させることも難しい。一方、仮想非ホロノミック拘束をロボットの挙動に与えた場合、必要な操作は並進力だけなので、トルク操作が扱えない条件であっても容易に対象物を目標位置・姿勢へ運搬することができている。ロボットの動作は実験前の簡単な説明だけであっても、目標位置までの経路計画に戸惑うことなく扱うことができている。人にとって想像しやすい挙動であることから、目標位置までの運搬が容易になったと考えられる。他の4人もほぼ同様の運搬挙動を示した。

以上の実験では、ディスプレイ上のターゲットを参照しながら目標位置まで運搬する方法であった。しかし、実際の運搬を考えたとき、対象物から目をそらしディスプレイを見ながらの運搬は実際の操作感覚とは異なったものになると考えられる。そこで、実空間に提示した目標位置を目で確認しながら、操作者が対象物を運搬できるように実験方法を変更する。また、様々な方向から目標位置へ運搬を行い、等方的なインピーダンス制御との比較実験を行う。対象物は長さ75cm、重さ0.7kgのアルミニウム製角パイプを用いる。操作者は対象物端点にある自由回転するハンドルを把持してロボットと協調運搬する。Fig.2.19 に示すように、目標位置は人とロボットそれぞれの位置を分銅で吊るして示す。対象物両端にはロボット側、人側それぞれに搬送位置の基準となるようにマーカーをつける。マーカーの外側の円を直径5cm、内側の円を2.5cmとする。操作者は、人側とロボット側両方のマーカーの2.5cm円内に分銅の先端が入るように位置決めを行う。両方の円内に分銅の先端が入った状態をパソコン上で確認したとき、計測者が被験者に声をかけ、目標位置に到達したことを明確に知らせる。この状態を3秒間維持したとき、運搬が終了したと判断する。具体的な初期位置・姿勢と目標位置・姿勢を Fig.2.20 に示す。ロボット側の目標位置・姿勢を中心とした半径60cmの円周上に12個のロボット側の初期位置・姿勢を考えた。図中の中央にある太線のマークを目標位置・姿勢としたとき、対象物の長軸に対して円周上にある初期位置・姿勢は軸対称であるので、対称に位置する初期位置・姿勢が存在しないように設定した。この12個の初期位置・姿勢をランダムに1人1~3個ずつ20~30代の男女計6人の被験者に実験を行ってもらった。被験者にはロボットに拘束条件を設定しないときと仮想非ホロノミック拘束を設定した時の2種類の動きを十分に説明し、ロボットを扱う練習を行わずに実験に移り計測を行った。拘束条件を与えたときと与えないときの運搬軌道の一例をそれぞれ Fig.2.21, Fig.2.22 に示す。また、全ての組み合わせに対する運搬時間の比較結果を Table 2.2 に示す。

多くの実験結果において、拘束条件を与えないインピーダンス制御で行った協調運搬は、対象物の横滑りが発生し運搬軌道が大周りになっていた。目標位置付近においても、

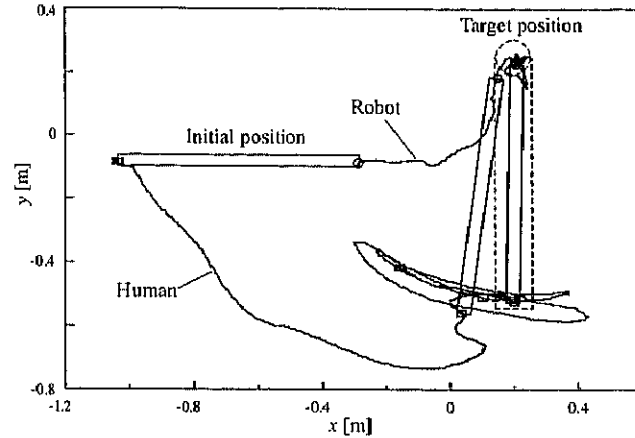


Figure 2.17: Trajectory of object without torque control (isotropic impedance control).

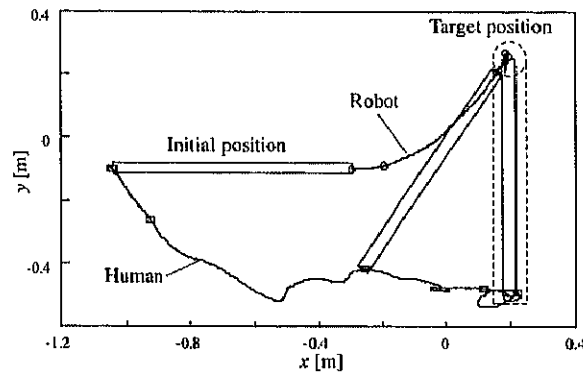


Figure 2.18: Trajectory of object without torque control (virtual nonholonomic constraint).

横滑りを抑えるために操作者は複雑な操作を行うことで目標位置へ到達していることがわかった。このことから、横滑りにより運搬が困難になることが推察される。実目標に対し運搬を行った今回の実験では、ディスプレイ上に目標位置を表示した実験と結果は変わらず横滑りの挙動は実際の対象物を見ても予測が困難であることが想像される。それに対し、仮想的な非ホロノミック拘束を与えた実験では、運搬軌道や目標位置付近の位置決めにおいても対象物の横滑りが抑えられているためスムーズな運搬が行えていることが確認された。このことは、改めて対象物の横滑りを防ぐことでトルク操作を扱うことの難しい長尺物の運搬が容易になることが示されたものと考えられる。

Fig.2.21, Fig.2.22 は、ある被験者の初期位置 (10) から目標位置まで運搬する軌道を表したものであるが、全ての被験者において同様の運搬傾向が見られた。拘束条件を与えない手法であっても目標位置まで到達できているが、運搬の挙動を見て判るように、横滑りした動きが発生しているために運搬する軌道が大きくなっていることがわかる。さらに、位置決め時においても複雑な切り替えし操作を行うことで目標位置へ到達している。それに対し、仮想的な拘束を与えた手法は、実験前に練習をすることなく説明をただけにもかかわらず、被験者はスムーズな軌道を描いて目標位置まで容易に協調運搬が行えていることが確認できる。このことから、人は荷車のような非ホロノミック拘束を有する道具の扱いを一般に心得ており、その操作を想像しながらロボットと協調運搬していることが推察される。

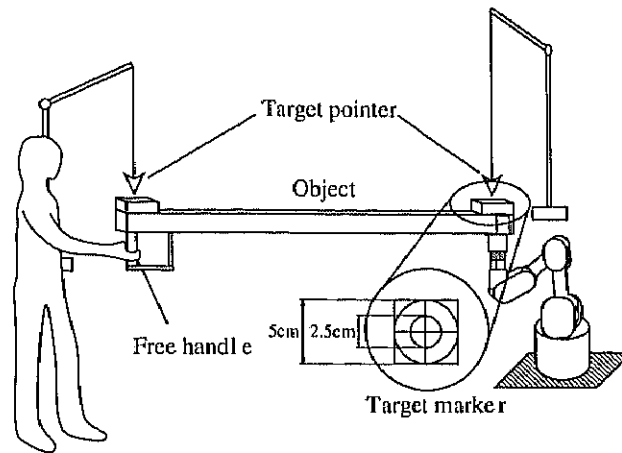


Figure 2.19: Target pointer and target marker for experiment.

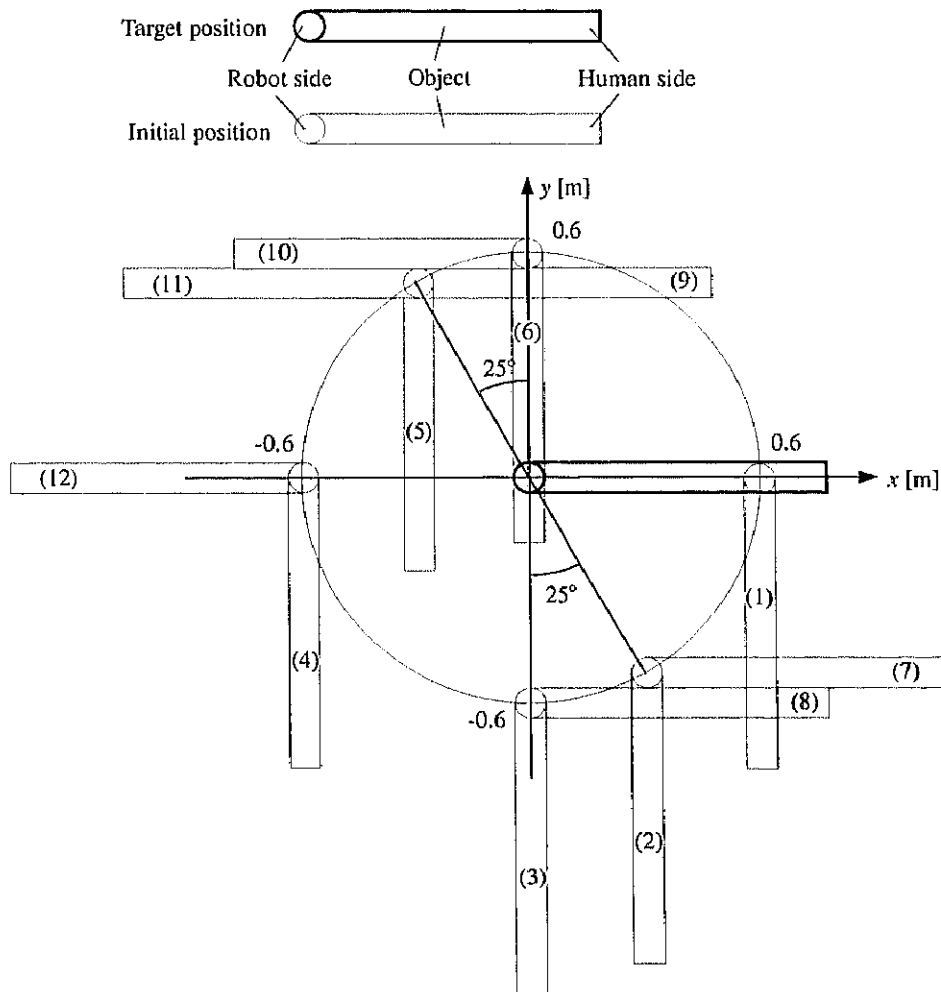


Figure 2.20: Initial positions and a target position.

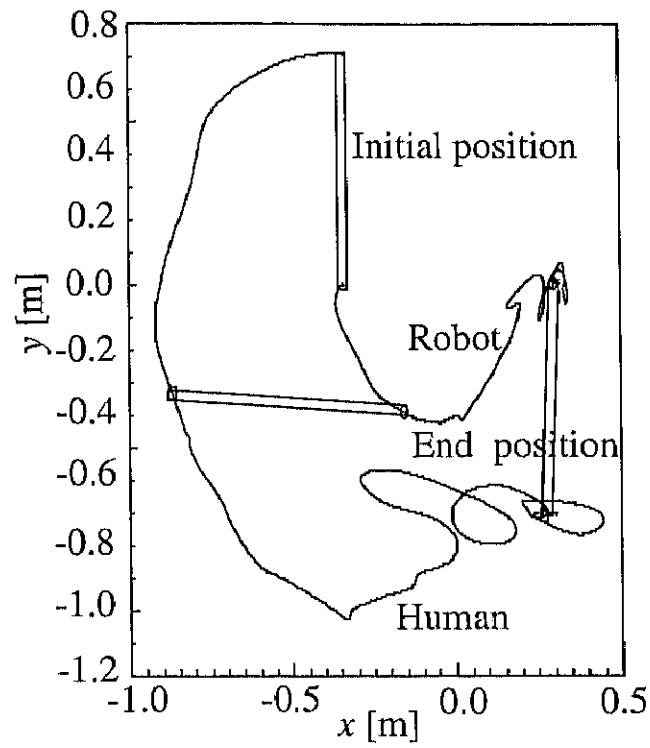


Figure 2.21: Transportation referring a real target (isotropic impedance control).

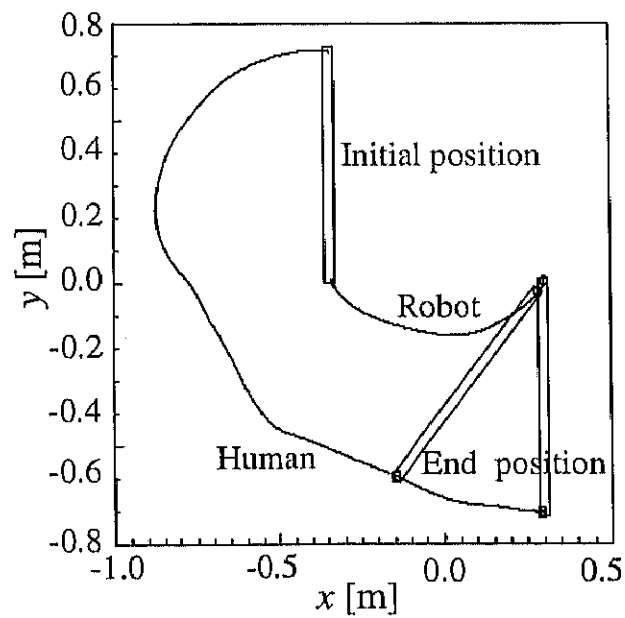


Figure 2.22: Transportation referring a real target (virtual nonholonomic constraint).

Table 2.2: Experimental result of the time-of-arrival.

Initial position	isotropic impedance control [s]	virtual nonholonomic constraint [s]
(1)	19.2	15.8
(2)	17.0	13.8
(3)	17.6	9.6
(4)	10.5	10.0
(5)	35.0	18.8
(6)	34.6	21.5
(7)	32.0	13.0
(8)	23.3	24.4
(9)	28.0	15.3
(10)	20.5	9.4
(11)	13.5	13.2
(12)	24.1	11.7

さらに、Table 2.2 に示す運搬時間の結果を見ても判るように、ほとんどの初期位置・目標位置の組み合わせにおいて、仮想非ホロノミック拘束を与える協調運搬が通常の拘束条件を与えない協調運搬よりも早く目標位置へ到達できている。操作者は目標位置までの最適な非ホロノミック軌道を想定できた場合には、スムーズな協調運搬が行え、最適な軌道からずれてしまった場合でも、道具の扱いを想定した操作者の切り返し操作により目標位置に到達することができる。様々な目標位置に対しても、拘束条件の無い場合より非ホロノミック拘束を与えた場合の運搬軌道は、位置決めの安定性が良く、それらが運搬時間の短縮に繋がったと考えられる。

2.7 結言

本章ではロボットの挙動へ単車輪に相当した仮想的な非ホロノミック拘束を与えることで、人とロボットによる協調運搬を容易に行うことのできる制御手法を提案し、対象物へ十分な操作力が与えられない場合に、提案手法が人の操作に及ぼす影響を人とロボットとの協調運搬実験により明らかにした。

その結果、仮想非ホロノミック拘束を与えることで、操作者は対象物の挙動が直感的に理解できるようになり、対象物の操作が容易になることを確認した。また、対象物の動きが普段用いたことのある拘束された車輪を備えた道具と等価であることから、それらを扱う同様の感覚でロボットとの協調運搬を行うことが可能となる。さらに、長尺物や大型物体を扱うとき、操作者が十分に扱うことのできる操作力が並進力に限定されることを明らかにした。拘束条件が人の想像した動きを超えないものに限定することが、安定した協調運搬を実現することになったといえる。また、このような利点をもたらす非ホロノミック拘束が、水平面内の任意の目的位置へ移動するという本来の目的を損なわずに人との協調運搬が行えることを確認した。本研究の結果から、非ホロノミック拘束を与える手法が人

とロボットとの協調運搬作業において有効であることが示された。

本研究では、非ホロノミック拘束をある場所に限定して与えることで道具を扱うようにロボットとの協調を行う方法を提案したが、道具には無くロボットにある機能として任意にそれらの拘束条件を変更できるようにすることで、一歩進んだ道具として利用できるものと考えられる。完全な知能化をせずに、限定された補助機能を付加するだけで操作者の要求に対する柔軟な対応ができるものと考えられる。