

第3章 3次元空間内の協調運搬

3.1 緒言

前章では、特に水平面内の協調運搬に注目して制御則を構築した。そのテーマは第1章で述べたとおり、3つに分けたテーマのうちの(1)「水平面内の協調運搬」に位置づけられる。本章では、(2)「3次元空間内の協調運搬」に対するアプローチとして、前章で提案した単車輪と同様の非ホロノミック拘束を利用することで3次元空間内の協調運搬を実現する手法を提案し、その有効性について検証を行う。

はじめに、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に分けて考える。各平面に対し、対象物の協調運搬手法を提案し、最終的に組み合わせることで3次元空間内の協調運搬手法へ拡張することを検討する。まず、水平面内の協調運搬手法については前章ですでに紹介してあるので、本章では鉛直平面内の協調運搬手法から考える。基本的に鉛直平面内の協調運搬の問題は、水平面内の協調運搬のときとほぼ同様であり、等方性のインピーダンス制御[21, 72, 24, 26, 30, 70, 71, 72]を用いるときは様々な条件を必要とする。さらに、対象物の端をロボットが把持する協調運搬の場合、等方性のインピーダンス制御を用いるには重力補償を必要とするため、ロボットの把持点に過大なトルクを要求する。したがって、この方法を適用することは困難である。一方、姿勢に拘束条件を加える手法[32, 37, 38]では、人の扱う操作力は並進力のみとなり容易に対象物を上下移動させることが可能になるが、可制御性が損なわれるといった弊害が生じる。

そこで、拘束条件を与え扱いやすい力に限定したとしても、可制御性を損なうことのない手法として、水平面内の協調運搬で用いた仮想非ホロノミック拘束を鉛直平面内のロボットの挙動に適用することを提案する。提案手法は、水平面内の協調運搬手法と同様に、拘束条件を考慮した軌道で対象物の昇降を行うことになる。日常の生活でしばしば使うことのある非ホロノミック拘束受動車輪を持つ台車は、人の巧みな操作により水平面内を自由に移動することができる。同様の機能と人の持つ技能を使うことで、鉛直平面内の対象物の操作も実現できるのではないかと考える。単車輪を模倣した非ホロノミック拘束は前章で証明されたように、拘束条件を与えられた平面内で可制御性が保たれる。さらに、操作者の扱う力は並進力のみを用いればよく、トルク操作を必要としない。鉛直平面内の協調運搬実験を行い、提案手法の効果を明らかにする。

次に、水平面内と鉛直平面内の仮想非ホロノミック拘束を与えた協調運搬を組み合わせ、3次元空間内の仮想非ホロノミック拘束による協調運搬手法を提案する。3次元空間内の非ホロノミック移動体の例として、潜水艦や飛行機、飛行船などが挙げられる。これらの移動体の制御は難しく、制御問題として良く扱われる題材である[82, 83, 84, 85]。人はこのような挙動をする3次元空間内の道具を用いた経験はないと考えられる。しかし、提案する手法は飛行機や潜水艦に見られる横滑りの挙動は存在せず、非ホロノミック拘束により一意に動く方向が定まる。したがって、操作者にとって動きを想像しやすく、普段用いたことのある非ホロノミックの動きを応用し、対象物を扱うことができるのではない

かと考えた。人とロボットによる協調運搬実験をすることで、3次元空間内の協調運搬に拡張した非ホロノミック特性を人が理解し、対象物を扱えることを確認する。得られた結果を元に提案手法の有効性を検証する。

3.2 鉛直平面内の協調運搬

本節では、鉛直平面内の協調運搬に仮想非ホロノミック拘束を適用する手法を導入し、実際に人が水平面内の協調運搬と同様に対象物を任意の位置・姿勢へ昇降できることを示す。前章と同様に、非ホロノミック拘束を与える場所は、操作者にとってわかりやすく一意に定まる場所として、対象物のロボット把持点に設けることを考える。水平面の動きと同じ場所に拘束条件を与えることで、鉛直平面内の対象物の扱いが容易に連想することが可能になると考える。

3.2.1 鉛直平面内の非ホロノミック拘束

まず、鉛直平面内の対象物の挙動を手押し台車と同様の動きにするために、ロボットの把持点へFig.3.1に示す対象物長軸方向を向いた単車輪と等価な非ホロノミック拘束を設定する。絶対座標系におけるロボットの把持点Rを (x_r, z_r) 、対象物の傾きを θ_Y とすると、非ホロノミック拘束条件は次式となる。

$$\dot{x}_r \sin \theta_Y - \dot{z}_r \cos \theta_Y = 0. \quad (3.1)$$

このような拘束条件を与えることで、対象物長軸方向への並進は可能だが、対象物法線方向への移動は行えなくなる。つまり、非ホロノミック拘束をアーム手先に設定した場合、鉛直方向へ直接昇降することはできない。そこで操作者は、ロボットの把持点を中心に対象物の姿勢を傾けることにより拘束方向を変化させ、長軸方向の並進移動のみで対象物の昇降を行う。姿勢を水平に保つ手法と比べ操作は複雑になるが、非ホロノミック拘束を与える手法は水平面内の動きと同様に鉛直平面内の可制御性が保たれるため、対象物の持ち替えや制御則の変更を行うことなく一連の動作で所望した位置・姿勢へ持ち運ぶことができる。扱う操作力も並進力のみであり、操作者が十分に扱うことのできる力である。

ロボット把持点における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。対象物長軸方向をX軸、その法線方向をZ軸、XZ-平面に垂直な軸をY軸とした手先座標系を考え、各軸に対し以下の特性を満たすインピーダンス制御を行う。

$$\begin{cases} f_{Xr} = m_X \dot{v}_{Xr} + b_X v_{Xr} \\ f_{Zr} = m_Z \dot{v}_{Zr} + b_Z v_{Zr} \\ \tau_{Yr} = i_Y \ddot{\theta}_{Yr} + c_Y \dot{\theta}_{Yr}. \end{cases} \quad (3.2)$$

$(f_{Xr}, f_{Zr}, \tau_{Yr})$ は各軸に対してロボットが発生する力・トルク、 $(v_{Xr}, v_{Zr}, \dot{\theta}_{Yr})$ は各軸の速度・角速度、 $(\dot{v}_{Xr}, \dot{v}_{Zr}, \ddot{\theta}_{Yr})$ は各軸の加速度・角加速度、 (m_X, m_Z, i_Y) は各軸の仮想質量・慣性モーメント、 (b_X, b_Z, c_Y) は各軸の仮想粘性・回転粘性係数である。

ここで、手先座標系の速度、 (v_{Xr}, v_{Zr}) と絶対座標系の速度 (\dot{x}_r, \dot{z}_r) の関係を考えると次式を得る。

$$\begin{cases} v_{Xr} = \dot{x}_r \cos \theta_Y + \dot{z}_r \sin \theta_Y \\ v_{Zr} = -\dot{x}_r \sin \theta_Y + \dot{z}_r \cos \theta_Y. \end{cases} \quad (3.3)$$

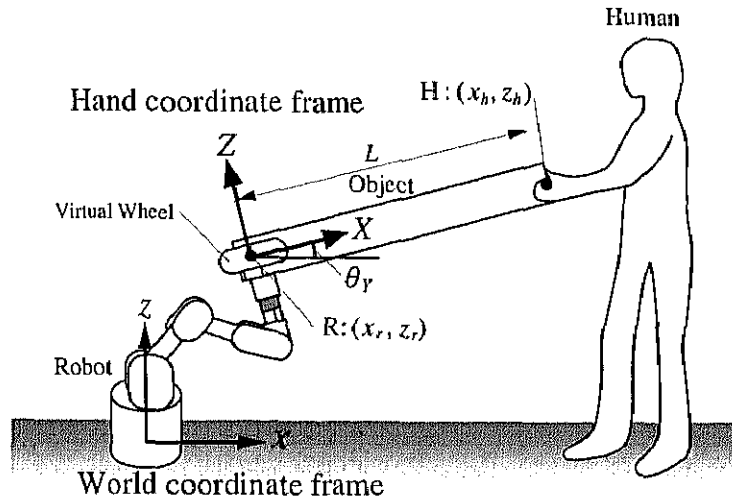


Figure 3.1: Nonholonomic constraint in vertical plane.

つまり、(3.1)式の拘束条件を実現するためには、 Z 軸方向速度 $v_{zr}=0$ とすればよい。そこで、 Z 軸方向のインピーダンス係数 (m_z, b_z) に大きな値を与え、 Z 軸方向速度・加速度の発生を最小限に抑えることで、仮想的な拘束を行う。一方、 X 軸方向並進と Y 軸周り回転方向のインピーダンス係数は小さく設定することで、人の操作力に対しスムーズに移動できるようにする。手先座標系に固定された拘束条件なので、対象物の回転に従って拘束方向も変化する単車輪と等価な非ホロノミック拘束が再現される。

(3.2)式よりアーム手先の加速度、角加速度は次式のように計算される。

$$\begin{cases} \dot{v}_{x_r} = (f_{x_r} - b_x v_{x_r})/m_x \\ \dot{v}_{z_r} = (f_{z_r} - b_z v_{z_r})/m_z \\ \dot{\theta}_{Y_r} = (\tau_{Y_r} - c_Y \dot{\theta}_{Y_r})/i_Y. \end{cases} \quad (3.4)$$

(3.4)式を積分することでアーム手先座標系の目標速度・角速度を求めることができる。この目標速度・角速度はロボットの関節座標系に変換することで、各関節軸の角速度指令を得ることができ、速度サーボ系に入力することで仮想非ホロノミック拘束の制御系が構成される。この制御則は対象物の特徴に関係ないので、質量や寸法が未知であっても鉛直平面内の任意の位置・姿勢へ昇降可能である。

3.2.2 協調運搬における重量の補助

人とロボットによる協調運搬時の重量補助について述べる。人とロボットが互いに離れた点で対象物を把持する協調運搬の場合、操作者の加えた力を直接計測することが不可能である。故に、パワーアシスト装置と異なり、人の力を増幅して対象物の重量を補助するといった方法は扱えない。人同士の協調運搬を想像してもわかるように、対象物を向かい合って把持した場合、対象物の比重が均一なものであれば重量を半分づつ補助して持ち運ぶことになる。このような協調運搬の片側が力の強いロボットであったとき、ロボットの把持点周りにトルクを与えることにより他端の重量補助を行う手法が考えられる。しかし、トルクを加えて力の補助を行うには対象物が剛体である場合に限り、また過大なトルク

クを与えることは対象物の変形や破損の原因に繋がる恐れも考えられる。そこで、対象物に対して並進力のみを用いた力の補助を考える。

まず、対象物を水平に維持した時の重量補助について考える。Fig.3.2に示すようにアーム手先から重心までの距離を l ，アーム手先から操作者把持点までの距離を L とすると、ロボットが支える対象物の重量は次式となる。

$$F_r = \frac{L-l}{L} Mg. \quad (3.5)$$

ロボットの重量補助を大きくするためには、ロボットの把持位置を重心に近づければよいことが判る。つまり、ロボットに全重量を支えてもらいたいときは、対象物の重心を把持させればよく、操作者は対象物のコントロールのみに集中することができる。

次に対象物を傾けた場合について考える。このとき、ロボットアーム手先の力センサ姿勢も傾くため、対象物の重量を長軸方向と法線方向に分割して考える。提案する仮想非ホロノミック拘束を用いた場合、対象物法線方向の動きは拘束されているため、法線方向の重量は操作者とロボットで分割される。しかし、拘束されていない長軸方向の対象物重力成分は、操作者が加えた力との合力として力センサに計測され、この2つの力を区別することができない。したがって、対象物を傾けた姿勢で維持する場合、操作者は長軸方向の重力成分を支える方向へ力を加えなくてはならない。この操作力は対象物を傾けるほど大きなものとなり、水平を維持するための操作力よりも操作者の負担が増すことになる。つまり、車輪の機構を有した道具で斜面を登ろうとしたとき、斜面の方向に分割される重力成分がそのまま負荷になり操作者に加わることと同様の問題が発生する。対象物の重量が既知である場合は、対象物の長軸方向重力成分を補助する力を加えることができるが、そのようなケースは限られる。

そこで、対象物を水平から傾けて位置・姿勢を維持するときの操作力増加量について考える。対象物を θ 傾けたとき、水平時にロボットが支えていた重量の長軸方向成分 $F_{ri}(\theta)$ を計算すると次式を得る。

$$F_{ri}(\theta) = \frac{L-l}{L} Mg \sin \theta. \quad (3.6)$$

アーム手先の力センサでは、この長軸方向重力成分と人の操作力を区別することができない。つまり、この重力成分が対象物を θ 傾けた時の人の操作力増加分となる。しかし、 $F_{ri}(\theta)$ の $\sin \theta$ の係数はもともと水平時にロボットが支えていた重量として計測することができる。したがって、対象物の現在の姿勢 θ がわかれば、Fig.3.3に示すように $F_{ri}(\theta)$ の力をロボットが長軸方向上向きへ引き上げるように制御することで、対象物を傾けた場合でも水平時に支えていた(3.5)式の重量を補助し続けることができる。人の操作力は、対象物をどのような姿勢で維持しても、一定に保つことができる。

ただし、ここでの議論は対象物を長軸方向へロボットが引き上げることのできる把持力を備えていることが前提である。マニピュレータ自身に対象物を支える力を備えていても、エンドエフェクタの能力によって対象物を引き上げる能力が無い場合がある。これは、本手法に限った問題ではなく、どのような制御手法であっても、対象物の姿勢変化に十分耐えうる把持機能をロボットのエンドエフェクタが備えていなければ、対象物の重量補助を一緒に行うことは不可能であることを述べておく。実用を考える場合、エンドエフェクタの把持力と摩擦力を考慮した制御[81]が必要になると考えられる。

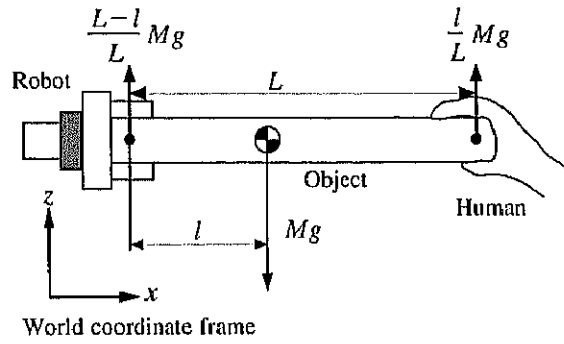


Figure 3.2: Human-robot sharing the load at horizontal posture.

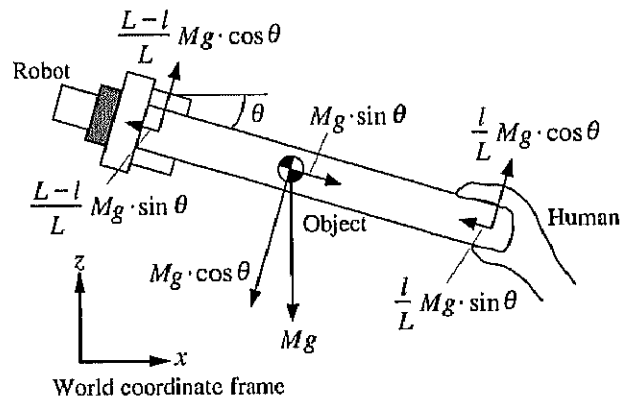


Figure 3.3: Human-robot sharing the load at inclined posture.

Table 3.1: Impedance parameters for vertical plane.

m_x	[kg]	5.5
b_x	[kg/s]	20
m_z	[kg]	100
b_z	[kg/s]	5000
i_y	[kg m ²]	5.5
c_y	[kg m ² /s]	20

3.2.3 鉛直平面内の協調運搬実験

実験には、三菱重工製汎用ロボットアーム PA-10 を用いる。アームの手首にはニッタ製 6 軸力／トルクセンサを取り付け、対象物からロボット手先に加わる力を計測し、その情報によりロボットを駆動する。制御にはパーソナルコンピュータ (CPU: Pentium III 550MHz) を用いる。制御周期は 2ms である。実験装置は前章で用いたものと同様の構成で行う。制御に用いる各座標軸のインピーダンス係数を Table 3.1 に示す。拘束条件を与える軸の仮想質量と粘性係数をそれぞれ拘束条件のない軸の約 20 倍、250 倍とした。また、提案する重力補償は対象物が軽量であるため、実験では使用していない。

はじめに予備実験として、操作者はディスプレイ上に映し出されたマーカを参照し、目標位置・姿勢へと対象物を協調運搬する実験を行った。対象物は長さ 26cm、重量 0.2kg と長さ 75cm、重量 0.7kg の 2 種類のアルミニウム製角パイプを用意した。ディスプレイ上の“+”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“○”で示された目標位置へ移動させ、かつ、直線で示された現在姿勢を水平から $\pm 0.1\text{rad}$ の範囲内に 3 秒間保持したとき目標位置に到達したとし、次の目標位置・姿勢へとディスプレイ上のマーカを移動させる。

長短それぞれの対象物の実験結果を Fig.3.4, Fig.3.5 に示す。図中の“○”で囲まれた範囲内をロボット手先の目標位置とし、対象物を 1~3 の順に協調運搬する。双方の実験ともに、操作者は水平面内で台車を扱うように切り返し操作をすることで、対象物を目標の位置・姿勢へスムーズに協調運搬することができている。提案手法では、対象物の長軸方向へ移動させることができるが、法線方向へ直接移動することはできない。そこで、操作者の把持位置を上下に動かすことによりロボット側把持位置を中心とした対象物の傾きを変え、斜めに搬送することにより対象物の昇降を実現している。実験の結果から、ロボット側の動きに拘束条件を与えた鉛直平面内の協調運搬においても、人は単車輪のような非ホロミック系を扱う能力を一般に有しており、仮想非ホロ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と考えられる。しかし、ロボットの動きに対して人の操作は大きくなってしまっている。それは 2 つの対象物の実験を比べて判るように、対象物の長さが長くなるほど顕著に表れるものとなる。そこで、操作者の鉛直方向の動きを小さくしようとする、今度は数多くの切り返しを行わなくてはならない。実作業では狭い場所での作業を余儀なく行わなくてはならない場合がある。そのような状況であっても、提案手法が実際に扱える操作であるか確かめるために、作業領域を限定した空間で目的位置までの協調運搬実験を行うことで、本手法の有効性を検証する。

まず、実空間内の目標位置を参照する鉛直平面内の協調持ち上げ実験を考える。運搬する対象物は長さ 75cm、重量 0.7kg のアルミニウム製角パイプとし、対象物の両端には直径 3cm の円形のマーカを取り付ける。この両端のマーカを実空間内に吊るした分銅の高さへ大体の位置が合うように運搬するタスクを被験者に与えた。マニピュレータのみの実験では作業領域を広く取ることができないため、対象物が移動できる範囲を定め、さらに、マニピュレータの第 6 関節のリミット角度を指定しておき、限定された作業領域内で目標位置・姿勢まで運搬を行ってもらった。また、運搬の精度や時間にこだわらずに目標位置まで運搬するように指示した。被験者には、実験前にロボットの動きや動かし方の例、作業範囲の条件を言葉で十分に説明した後、練習をせずに実験と計測を行った。一人につき同じ初期位置から同じ目標位置までの協調持ち上げ実験を 2 回行った。被験者は、20 代の男性 4 人、女性 1 人の計 5 名である。計測するデータは、目標位置までの人とロボットの

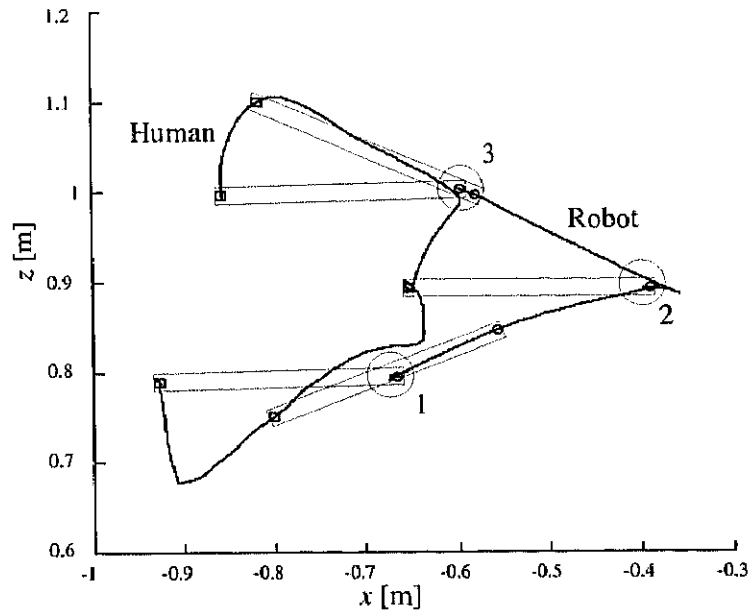


Figure 3.4: Trajectory of object referring targets in the monitor display(short object).

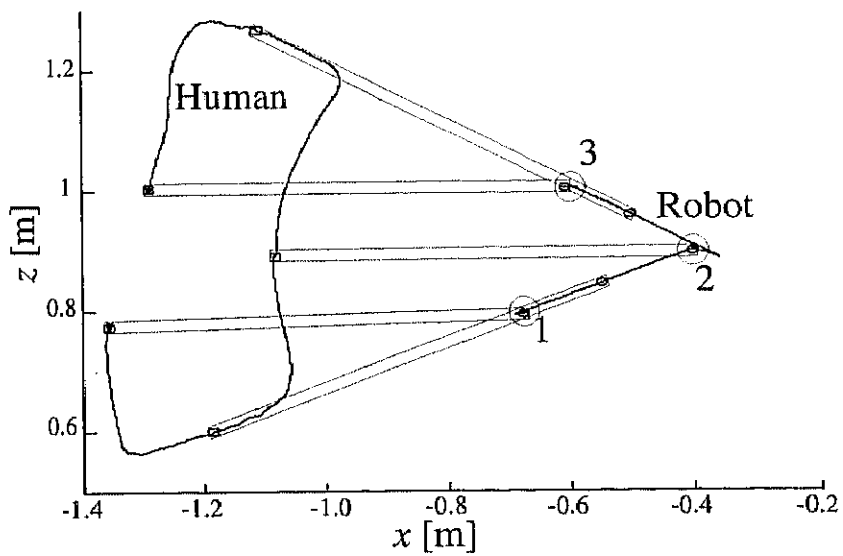


Figure 3.5: Trajectory of object referring targets in the monitor display(long object).

Table 3.2: Experimental results (time of arrival).

Person	1st arrival time [s]	2nd arrival time [s]
A	82	75
B	52	18
C	19	18
D	55	47
E	43	30

軌道データ、到達までに要する時間とする。ロボットの初期位置と目的位置はそれぞれ、 $(x_r, z_r, \theta_r) = (-0.68, 0.73, 0.00), (-0.60, 1.10, 0.00)[\text{m}, \text{m}, \text{rad}]$ とする。またFig.3.6に示すように、対象物の移動できる範囲を絶対座標系の x 軸方向 $-1.60 \sim -0.35[\text{m}]$ に限定し、その領域から外へ移動できないように制御でリミットをかける。また、マニピュレータの初期関節角度は $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7) = (0, -29, 0, -83, 0, 112, 0)$, [deg]となっており、第6軸の初期角度は制御リミットとして与えてある $120[\text{deg}]$ に近いので、操作者はマニピュレータの第6軸の回転角を考慮した運搬を行わなくてはならない。

実験の結果、初めてのロボットとの協調運搬であり、また、はじめての目標位置・姿勢であっても、全員の被験者が目標位置まで対象物を協調運搬することができた。Table3.2は初期位置から目標位置までに到達するまでの時間を表す。1回目の実験では操りに戸惑う場面も見られたが2回目は1回目の操作よりも早く目的位置へ運搬できていることが全ての被験者に見られる。作業領域が限られた環境であっても人はロボットに与えた非ホロノミック拘束の動きを理解し、その環境に合った目的位置までのパスプランニングが行えていることがいえる。Fig.3.7は、一人の被験者の2回目の実験結果であるが、被験者全体を通して、同様の傾向が見られた。移動できる範囲が狭いため、小刻みな繰り返し操作をすることで作業領域内で目的位置・姿勢までの移動を行っている。

3.2.4 鉛直平面内の実験の考察

本手法を用いた協調運搬は、はじめて扱う操作者であっても、事前に対象物の動きのルールを教えるだけで鉛直平面内の任意の位置・姿勢へ昇降することが可能であることが確認された。この結果は前述したとおり、対象物の非ホロノミック挙動が人にとって理解の範疇にある動きであるためと考えられる。人が日常扱う非ホロノミック拘束の動きは、水平面内を移動する車輪を有する道具に限られるが、実験において全ての被験者が目標位置までの協調運搬を実現できていることから、人は鉛直平面内で単車輪の非ホロノミック拘束を扱う能力を備えているものといえる。

本手法は、拘束条件を与えることで動きの自由度が減少しているため、対象物を上下動させるためには繰り返し操作をする必要がある。その繰り返し操作は、対象物が長くなるほどロボット把持点を中心とする回転半径が大きくなるため、対象物を傾けるための動作が大きくなる。また、作業範囲が狭い場合も数多くの繰り返し操作を要求される。長尺物になると扱い難いと考えられるトルク操作を用いる必要は無いが、これらの欠点は否めない。しかし、拘束条件に沿った軌道に従って動くことで、操作者の意図した方向のみに正確な移動が行え、環境に合わせたパスプランニングの変更を人が自在に行えることが本手

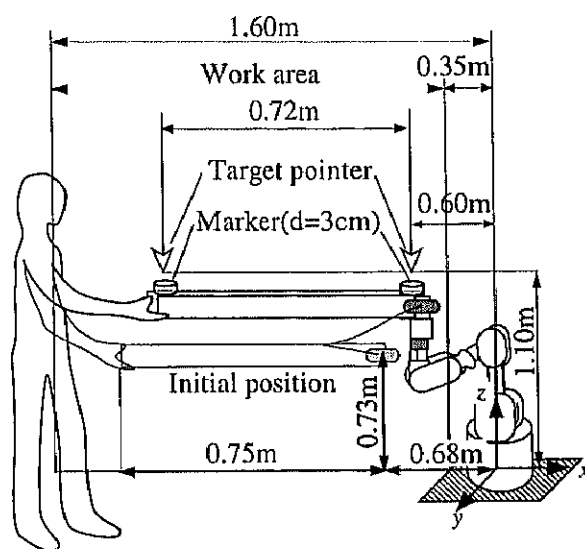


Figure 3.6: Experimental setup for referring a real target.

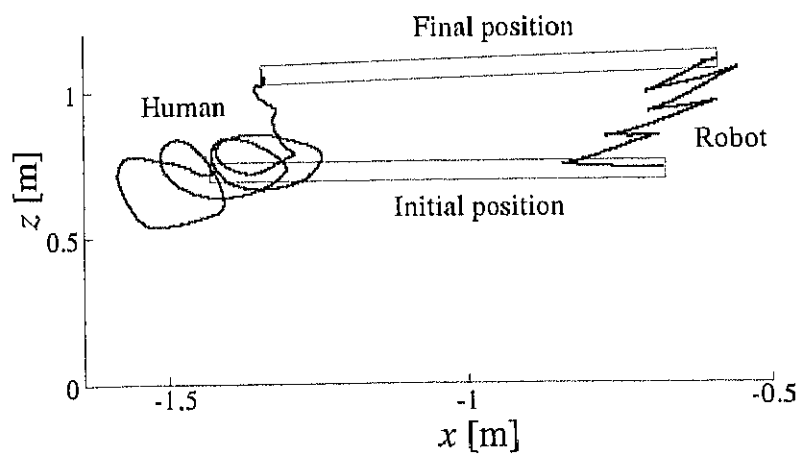


Figure 3.7: Trajectory of object referring a real target.

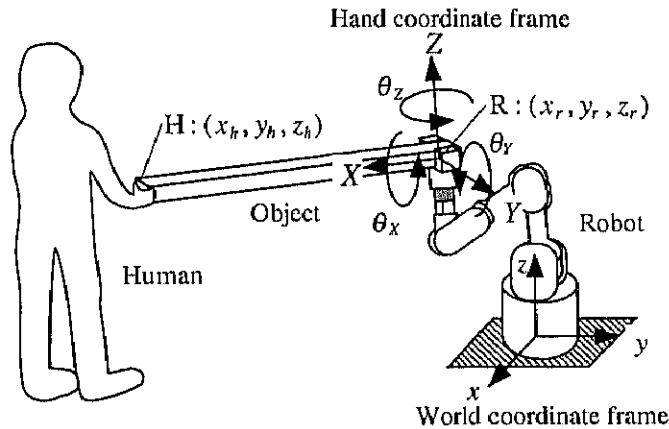


Figure 3.8: Rotation about hand coordinate frame.

法の利点であると考ええる。

3.3 3次元空間内の協調運搬

本節では、前節で提案した鉛直平面内の非ホロノミック拘束を利用する協調運搬に、前章で提案した水平面内の非ホロノミック拘束を利用する協調運搬を組み合わせ、3次元空間内の任意の位置・姿勢へ協調運搬することを考える。3次元空間内の非ホロノミック拘束を与える場所はこれまでと同様に、対象物のロボット把持点とし、対象物の長軸方向の並進移動とロボット把持点を中心とした姿勢回転が可能な動きを考える。つまり、水平面内と鉛直平面内の非ホロノミック拘束を与える点を同一の場所とし、双方の協調運搬制御を組み合わせることを考える。

3.3.1 3次元空間内の非ホロノミック拘束

水平面内と鉛直平面内の協調運搬を組み合わせ、3次元空間内の目標位置へ協調運搬する手法について述べる。はじめに、対象物長軸方向をX軸としたFig.3.8に示すロボット手先座標系へ、単純に水平面内と鉛直平面内の手法を組み合わせることを考える。つまり、手先座標系Y, Z軸方向並進とX軸周りの姿勢回転を拘束し、X軸方向並進とY, Z軸周りの姿勢回転を自由に行えるようにする。ここで、この手法を用いた3次元空間内の具体的な姿勢回転について考える。これより後の説明では、対象物の3次元空間内の姿勢をZ-Y-Xオイラー角で表現し、手先座標系の初期姿勢は絶対座標系に一致しているものとする。このとき、X軸周りの回転角 θ_x はロール角、Y軸周りの回転角 θ_y はピッチ角、Z軸周りの回転角 θ_z はヨー角に相当する。

まず、手先座標系Z軸, Y軸の順番で α, β と回転させたときの姿勢をZ-Y-Xオイラー角で表現すると

$$\theta_z = \alpha, \theta_y = \beta, \theta_x = 0. \tag{3.7}$$

同様に手先座標系Y軸, Z軸の順番に β, γ と回転させたときの姿勢をZ-Y-Xオイラー

角で表現すると

$$\begin{cases} \theta_Z = \text{Atan2}(\sin \gamma, \cos \beta \cos \gamma) \\ \theta_Y = \text{Atan2}(\sin \beta \cos \gamma, \sqrt{(\cos \beta \cos \gamma)^2 + (\sin \gamma)^2}) \\ \theta_X = \text{Atan2}(\sin \beta \sin \gamma, \cos \beta). \end{cases} \quad (3.8)$$

Z軸, Y軸の順番で回転させた場合は, (3.7)式に示すようにヨー角が α , ピッチ角が β となりロール角の回転は発生しない. それに対し, Y軸, Z軸の順番に回転させた場合, (3.8)式に示すようにヨー角, ピッチ角の回転の他にロール角の回転が発生し姿勢が振れてしまう. 回転する軸の順番により最終的な姿勢が異なり, また, 2つの回転軸で空間内の姿勢3自由度を制御することは日常生活で人が経験する動きに無いため, 扱いが困難であると考えられる. そこで, X軸周りの姿勢の振れを制御する手法について考える.

これまで水平面内, 鉛直平面内で行ってきた姿勢の回転は, それぞれの平面の手先座標系に垂直な軸周りに対象物を回転させることで姿勢の変更を行ってきた. しかし3次元空間内の手先座標系を考えた場合, 手先座標系の回転軸は絶対座標系の水平面と鉛直平面に垂直を維持しているわけではない. したがって, ある姿勢での手先座標系Y, Z軸の回転は(3.8)式の例に示すように複数の姿勢角に影響してくる.

この問題を解決するために, 手先座標系Z軸周りの回転の代わりに, Fig.3.9に示すようなマニピュレータ手先から絶対座標系 $x-y$ に垂直におろしたP軸周りに3次元空間内のヨー角の姿勢回転を行うことを考える. つまり, 水平面内の姿勢を床面に映った写像に対し回転させることで対象物のヨー角を決定する. ここで, 3次元空間内の姿勢角ロール・ピッチ・ヨーを制御するために, 対象物をX, Y, P軸周りに回転させることを考える. P軸は絶対座標系に対し姿勢が固定されているので, X, Y軸の回転に影響しない. しかし, X軸とY軸の姿勢はお互いの回転角度により姿勢が変化するため, ある姿勢角によってはX, Y, P軸が同一平面上に位置することになる. 例えばFig.3.10に示すように, X軸周りに対象物を ± 90 度回転したとき, 回転軸であるX, Y, Pは同一平面状に存在し, 姿勢を制御する上で特異姿勢となり対象物のピッチ角が制御できなくなる.

そこで, Fig.3.11に示すようなP軸と手先座標系Xに対し垂直を維持するQ軸をマニピュレータ手先に設定し, ピッチ角をQ軸周りに決定する方法が考える. この軸上でピッチ角を決定することでX軸周りの回転に関係なくピッチ角を決定することができる. しかし, たとえQ軸周りにピッチ角を操作したとしても, Q軸周りに ± 90 度回転させたとき, 手先座標系X軸とヨー回転をするP軸が同一直線上に位置し特異姿勢となってしまう. これらの問題は, P軸が絶対座標系に対し固定された姿勢をとることに原因がある.

ここで, もう一度Z-Y-Xオイラー角表記について考えてみる. 手先座標系X軸周りの振れはY軸回転後のZ軸回転のとき, オイラー角の3つの姿勢角に影響するような回転が生じるために発生する. しかし, このX軸周りの回転は対象物を把持している操作者に直接知ることができる. そこで, X軸周りにインピーダンス制御をすることで, 操作者が直接対象物のロール角を望ましい角度へ修正することができれば, 姿勢角の回転のために新たな軸を考える必要もなく, 直感的な操作ができるものとする. つまり, 手先座標系Y, Z軸周りの回転で発生したX軸周りの回転角は, X軸周りの回転を直接操作することで所望する姿勢角へ修正する. 手先座標系での仮想非ホロノミック拘束は, Y, Z軸方向並進の動きを拘束し, X軸方向並進とX, Y, Z軸周りの姿勢回転を自由に行えるようにする. 手先座標系X, Y, Z軸周りに回転軸を取ることで各回転軸は常に他の回転軸と直角を維持することになるので, 姿勢回転に伴う特異姿勢の発生が起こることはない.

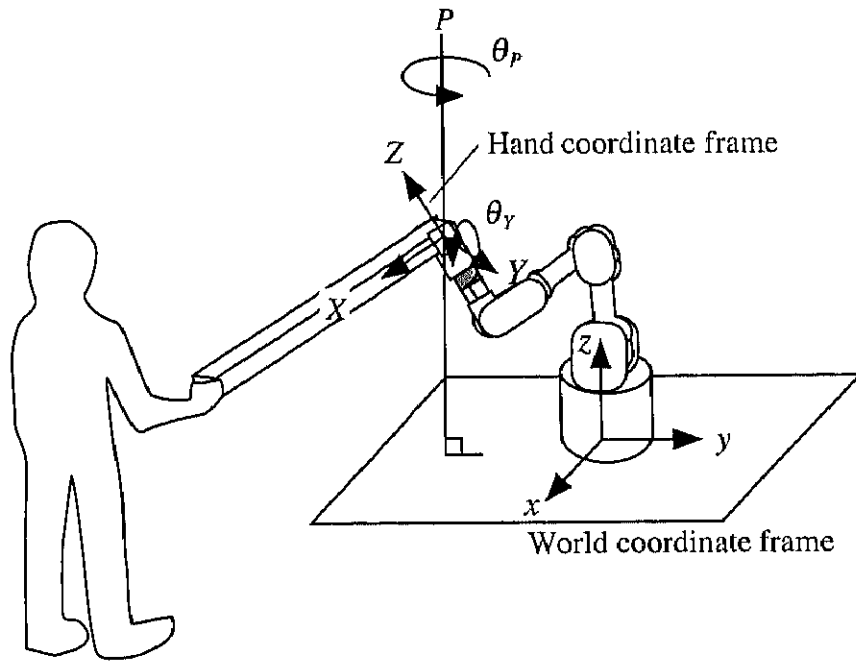


Figure 3.9: Rotation about P -axis.

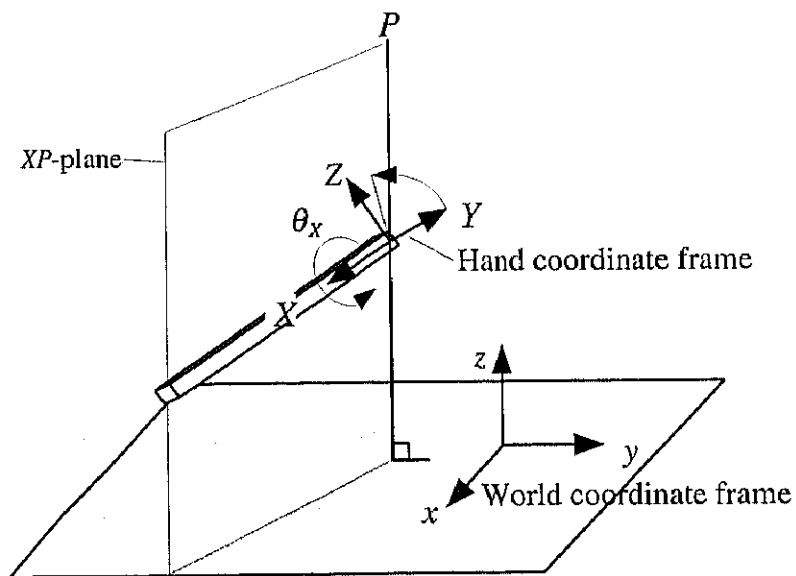


Figure 3.10: Example of the singular posture.

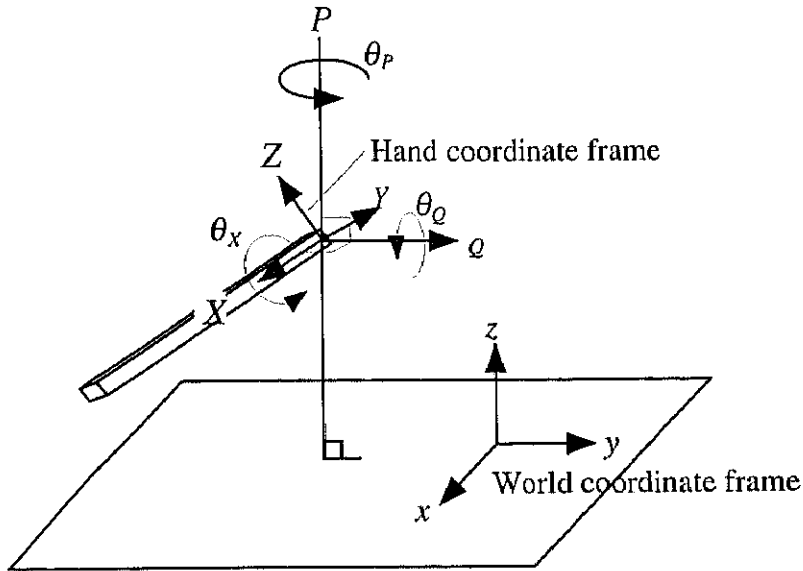


Figure 3.11: Rotation about Q-axis.

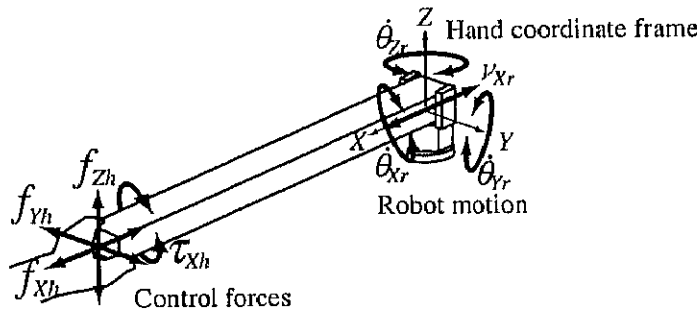


Figure 3.12: Control forces and robot motion.

このとき、操作者は Fig.3.12 に示すように、並進力3自由度と X 軸周りのトルク操作により対象物の位置決めを行う。これまで長尺物を扱うとき、トルク操作により他端へ並進力を伝えることは困難であると考えられることから、並進操作力のみによる位置・姿勢の制御を提案してきた。しかし、X 軸周りのトルク操作は、対象物が剛体であると仮定すると、直接他端へ伝えることができる。したがって、操作者にとって十分扱いやすい操作力であると考ええる。

3.3.2 3次元空間内の可制御性の証明

提案する手法の可制御性について証明する。操作者把持点を (x_h, y_h, z_h) 、ロボット把持点を (x_r, y_r, z_r) 、対象物の Z-Y-X オイラー角を $(\theta_Z, \theta_Y, \theta_X)$ 、対象物の長さを L とする。ただし、オイラー角姿勢表記の特異値発生を防ぐため、 $\theta_Y \neq \pm\pi/2$ と仮定する。ロボット把持点の仮想的な車輪において Y, Z 軸方向に対して横滑りの速度が発生しないという条

件は,

$$\begin{aligned} \dot{x}_r(\sin \theta_Z \cos \theta_Y) + \dot{y}_r(\sin \theta_Z \sin \theta_Y \sin \theta_X - \cos \theta_Z \cos \theta_X) \\ + \dot{z}_r(\sin \theta_Z \sin \theta_Y \cos \theta_X - \cos \theta_Z \sin \theta_X) = 0, \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$-\dot{x}_r \sin \theta_Y + \dot{y}_r \cos \theta_Y \sin \theta_X + \dot{z}_r \cos \theta_Y \cos \theta_X = 0. \quad (3.10)$$

ロボットの把持点と操作者の把持点の関係は,

$$\begin{cases} x_h = L \cos \theta_Z \cos \theta_Y + x_r \\ y_h = L \sin \theta_Z \cos \theta_Y + y_r \\ z_h = -L \sin \theta_Y + z_r. \end{cases} \quad (3.11)$$

(3.11) 式の両辺を時間で微分して速度の関係を求めると,

$$\begin{cases} \dot{x}_h = -L\dot{\theta}_Z \sin \theta_Z \cos \theta_Y - L\dot{\theta}_Y \cos \theta_Z \sin \theta_Y + \dot{x}_r \\ \dot{y}_h = -L\dot{\theta}_Z \cos \theta_Z \cos \theta_Y - L\dot{\theta}_Y \sin \theta_Z \sin \theta_Y + \dot{y}_r \\ \dot{z}_h = -L\dot{\theta}_Y \cos \theta_Y + \dot{z}_r. \end{cases} \quad (3.12)$$

ここで, (3.9),(3.10),(3.12) 式からこの系の状態方程式を求める.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{z}_r \\ \dot{\theta}_Z \\ \dot{\theta}_Y \end{pmatrix} = \mathbf{R}_T \begin{pmatrix} \dot{x}_h \\ \dot{y}_h \\ \dot{z}_h \end{pmatrix} = \mathbf{g}_1 \dot{x}_h + \mathbf{g}_2 \dot{y}_h + \mathbf{g}_3 \dot{z}_h. \quad (3.13)$$

\mathbf{R}_T は 5×3 行列, $\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \mathbf{g}_3$ は 5×1 ベクトルであり, 以下の関係を満たす.

$$\begin{cases} \mathbf{g}_1 = \frac{\cos \theta_Y \cos \theta_Z}{D} (A, B, C, E, F)^T \\ \mathbf{g}_2 = \frac{\cos \theta_Y \sin \theta_Z}{D} (A, B, C, E, G)^T \\ \mathbf{g}_3 = -\frac{\sin \theta_Y}{D} (A, B, C, J, K)^T. \end{cases} \quad (3.14)$$

ここで, 係数 $A, B, C, D, E, F, G, J, K$ は以下の関係を満たす.

$$\begin{cases} A = \cos \theta_Y \cos \theta_Z (\cos^2 \theta_X - \sin^2 \theta_X) \\ B = \cos \theta_X \sin \theta_Z - \sin \theta_X \sin \theta_Y \cos \theta_Z \\ C = \cos \theta_X \sin \theta_Y \cos \theta_Z - \sin \theta_X \sin \theta_Z \\ D = A \cos \theta_Y \cos \theta_Z + B \cos \theta_Y \sin \theta_Z + C \sin \theta_Y \\ E = \frac{C}{L \cos \theta_Y} \\ F = \frac{C \sin \theta_Y \sin \theta_Z - B \cos \theta_Y}{L \cos^2 \theta_Y \cos \theta_Z} \\ G = \frac{D + C \sin \theta_Y \sin^2 \theta_Z - B \cos \theta_Y \sin \theta_Z}{LB \cos^2 \theta_Y \cos \theta_Z \sin \theta_Z} \\ J = -\frac{C \sin \theta_Y + D}{L \cos \theta_Y \sin \theta_Y} \\ K = \frac{B \cos \theta_Y - \sin \theta_Z (D + C \sin \theta_Y)}{L \cos^2 \theta_Y \cos \theta_Z}. \end{cases} \quad (3.15)$$

(3.13)式は、状態変数をロボット把持部の位置・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。

(3.13)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。これより後の計算は、数値計算ソフトウェア Mathematica を用いる。ここで、ベクトル場 g_1, g_2, g_3 のリー括弧積 $[g_1, g_2], [g_2, g_3], [g_3, g_1]$ を含んだ $(g_1, g_2, g_3, [g_1, g_2], [g_2, g_3], [g_3, g_1])$ からなる 5×6 行列を m とする。コマンド $n = \text{NullSpace}[m]$ で得られる基底ベクトルのリストを、コマンド $\text{Length}[n]$ で評価することで特定の行列に対して重複している方程式の数を見出すことができる。この個数を行列 m の列の個数から差し引くと行列 m の階数を得ることができる。その結果、行列 m の階数は5となりフルランクであることがいえる。したがって、(3.13)式の系はリー代数階数条件を満たし、可制御である。つまり、操作者把持点の並進速度のみの扱いで、ロボット把持部の位置 (x_r, y_r, z_r) と姿勢 (θ_x, θ_y) を制御することができる。また、姿勢 θ_x の制御は X 軸周りのインピーダンス制御により回転を行うので自明に可制御である。

3.3.3 手先座標系における異方性インピーダンス

提案する手法を実現するための制御則について説明する。対象物長軸方向を X 軸とした Fig.3.8 に示す手先座標系を考え、各軸に対し次式の特性を満たす独立したインピーダンス制御を行う。

$$\begin{cases} f_{Xr} = m_X \dot{v}_{Xr} + b_X v_{Xr} \\ f_{Yr} = m_Y \dot{v}_{Yr} + b_Y v_{Yr} \\ f_{Zr} = m_Z \dot{v}_{Zr} + b_Z v_{Zr} \\ \tau_{Xr} = i_X \ddot{\theta}_{Xr} + c_X \dot{\theta}_{Xr} \\ \tau_{Yr} = i_Y \ddot{\theta}_{Yr} + c_Y \dot{\theta}_{Yr} \\ \tau_{Zr} = i_Z \ddot{\theta}_{Zr} + c_Z \dot{\theta}_{Zr}. \end{cases} \quad (3.16)$$

ここで $(f_{Xr}, f_{Yr}, f_{Zr}, \tau_{Xr}, \tau_{Yr}, \tau_{Zr})$ は各軸に対してロボットが発生する力・トルク， $(v_{Xr}, v_{Yr}, v_{Zr}, \dot{\theta}_{Xr}, \dot{\theta}_{Yr}, \dot{\theta}_{Zr})$ は各軸の速度・角速度， $(\dot{v}_{Xr}, \dot{v}_{Yr}, \dot{v}_{Zr}, \ddot{\theta}_{Xr}, \ddot{\theta}_{Yr}, \ddot{\theta}_{Zr})$ は各軸の加速度・角加速度， $(m_X, m_Y, m_Z, i_X, i_Y, i_Z)$ は各軸の仮想質量・慣性モーメント， $(b_X, b_Y, b_Z, c_X, c_Y, c_Z)$ は各軸の仮想粘性・回転粘性係数である。(3.9)，(3.10)式の拘束条件を実現するために、 Y 軸と Z 軸方向の仮想質量・粘性項を大きく設定することで速度・加速度の発生を抑える。また、 X 軸方向並進と X, Y, Z 軸周りの姿勢回転については、自由運動に近いスムーズな動きができるように慣性、粘性を小さく設定する。(3.16)式よりアーム手先の加速度、角加速度は次式のように計算される。

$$\begin{cases} \dot{v}_{Xr} = (f_{Xr} - b_X v_{Xr}) / m_X \\ \dot{v}_{Yr} = (f_{Yr} - b_Y v_{Yr}) / m_Y \\ \dot{v}_{Zr} = (f_{Zr} - b_Z v_{Zr}) / m_Z \\ \ddot{\theta}_{Xr} = (\tau_{Xr} - c_X \dot{\theta}_{Xr}) / i_X \\ \ddot{\theta}_{Yr} = (\tau_{Yr} - c_Y \dot{\theta}_{Yr}) / i_Y \\ \ddot{\theta}_{Zr} = (\tau_{Zr} - c_Z \dot{\theta}_{Zr}) / i_Z. \end{cases} \quad (3.17)$$

(3.17)式を積分することでアーム手先座標系の目標速度・角速度を求めることができる。この目標速度・角速度を前章で行ったロボット制御と同様に関節座標系へ変換することで、各関節軸の角速度指令を得ることができ、速度サーボ系に入力することで仮想非ホロ

ノミック拘束の制御系が構成される。この制御則は対象物の特徴に関係ないので、質量や寸法が未知であっても3次元空間内の任意の位置・姿勢へ運搬可能である。3次元空間内の協調運搬制御においても、手先座標系の各軸に独立したインピーダンス制御を行うだけで容易に提案する非ホロノミック拘束が導入可能である。

3.3.4 3次元空間内の協調運搬実験

本節では、汎用の多自由度ロボットアームを用いて、前節で提案した制御則をロボットアームに組み込み、実際に人がその動きを理解し3次元空間内の対象物の操作ができるか検証を行ったので、その結果について述べる。

実験装置は、鉛直平面内の協調運搬実験を行った装置と同様の構成を用いる。運搬対象物は長さ75cm、重量0.7kgのアルミニウム製角パイプを用い、前節で提案した重力補償は対象物が軽量であるため、今回の実験では使用していない。実験の様子をFig.3.13に示す。人とロボットは向かい合って長尺物の両端を把持し、実空間上に提示された目標位置へ対象物を一致させるように協調運搬を行う。ロボットの初期位置、及び目標位置は絶対座標系とZ-Y-Xオイラー角でそれぞれ、 $(x_r, y_r, z_r, \theta_Z, \theta_Y, \theta_X) = (-0.47, -0.47, 0.37, 0.0, 0.0, 0.0), (0.35, 0.2, 0.63, \pi/2, 0.0, 0.0)$ [m, m, m, rad, rad, rad]とする。制御に用いる各座標軸のインピーダンス係数をTable 3.3に示す。拘束条件を与える軸の仮想質量と粘性係数をそれぞれ拘束条件のない軸の約20倍、250倍とした。

実験では手先座標系X, Y, Zの全ての回転軸で姿勢回転を行う提案手法とその比較として手先座標系Y, Z軸のみで姿勢回転を行った場合の対象物の運搬軌道を計測する。X, Y, Zの全ての回転軸に自由回転に近いインピーダンス制御を行った場合の協調運搬結果をFig.3.14に、手先座標系Y, Z軸のみで姿勢回転を行った実験結果をFig.3.15に、双方の実験におけるX軸周りの回転角をFig.3.16に示す。手先座標系Y, Z軸のみで姿勢回転を行った協調運搬では、目標位置・姿勢に到達しているように見えるがX軸周りに姿勢の振れが生じてしまっている。Y, Z軸周りの回転だけでは、このX軸周りの振れを修正する操作は複雑になり、操作者にとって直感的に理解し難い。それに対し、X, Y, Z軸周りについて回転を行った協調運搬では、X軸周りに発生した回転角を操作者がトルクを加え意図的に修正することができている。操作者はロボットの動きの特性を理解し、3次元空間内の位置・姿勢6自由度の位置決めが行えている。この結果、人が台車等の非ホロノミック系を扱う能力は3次元空間内の位置決めにおいても応用することができ、仮想非ホロノミック拘束を与える手法はロボットとの協調運搬に有効な手段であると考えられる。

3.4 結言

対象物を運搬する目的位置は、水平面内の動きに限らず、3次元空間内の昇降や姿勢変化を伴う任意の場所が望まれる。そこで本章では、人とロボットが長尺物の両端を把持し、協調して3次元空間内の任意の位置・姿勢へ対象物を運搬するための手法について検討を行った。

まず、鉛直平面内で対象物を任意の位置・姿勢へ協調運搬するための手法を提案した。提案手法は水平面内の協調運搬と同様、ロボット把持点に対象物長軸方向の一輪車と等価な仮想非ホロノミック拘束を与えることで対象物の動きを限定する方法を導入した。この

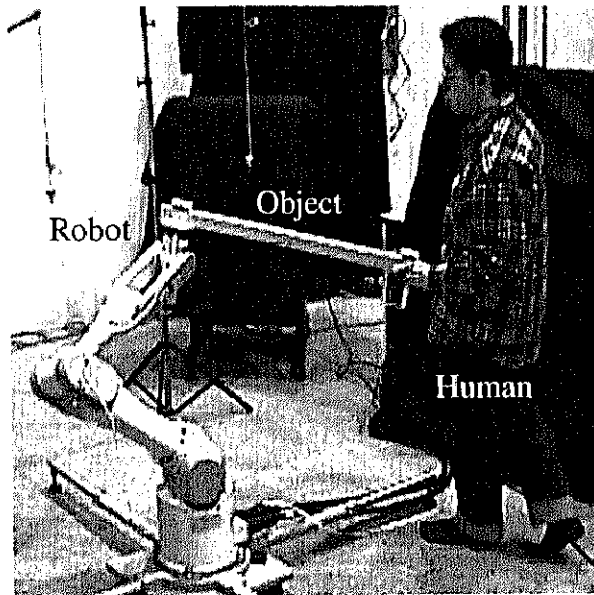


Figure 3.13: Experiment of 3-D transportation.

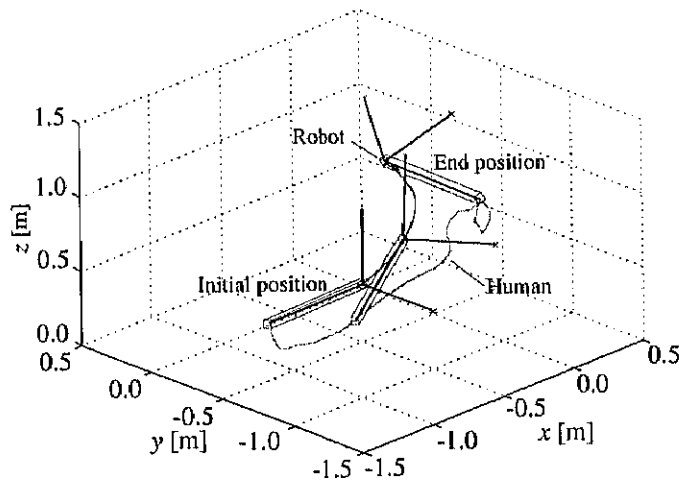


Figure 3.14: Experimental result (rotation about Y,Z-axes).

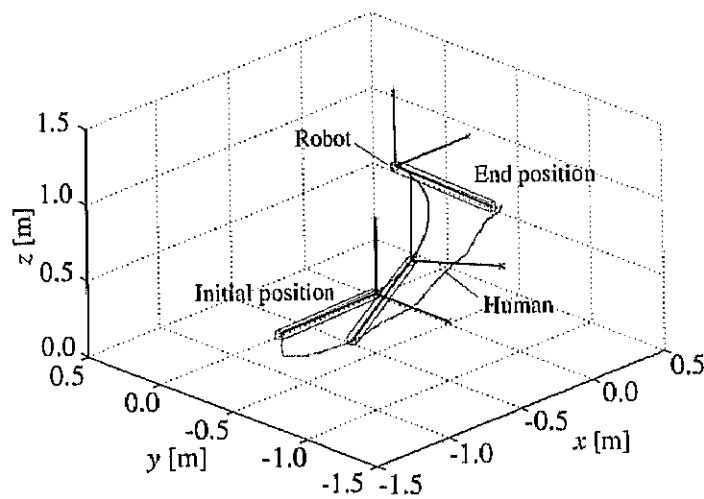


Figure 3.15: Experimental result (rotation about X,Y,Z-axes).

Table 3.3: Impedance parameters for 3-D space.

m_X	[kg]	5.5
b_X	[kg/s]	20
m_Y	[kg]	100
b_Y	[kg/s]	5000
m_Z	[kg]	100
b_Z	[kg/s]	5000
i_X, i_Y, i_Z	[kg m ²]	5.5
c_X, c_Y, c_Z	[kg m ² /s]	20

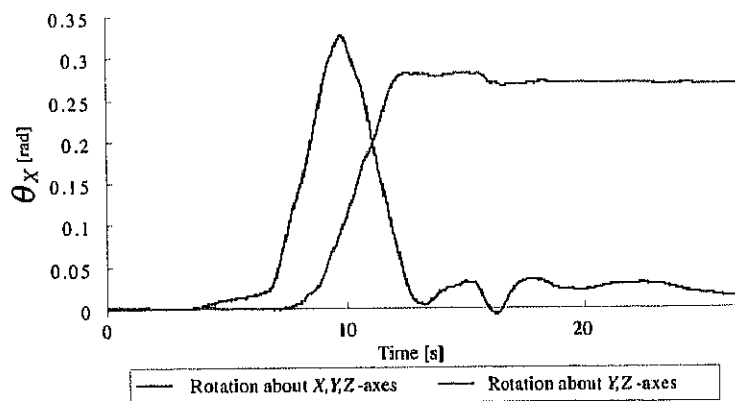


Figure 3.16: Rotation angle about X-axis.

方法では水平面内の車輪を有した道具と同じ操作方法で任意の位置・姿勢へ協調昇降が可能となる。実機への導入には前章と同様に、手先座標系におけるインピーダンス制御を用いてロボットの把持部に仮想的な非ホロノミック拘束を実現した。人とロボットアームによる協調運搬実験の結果、人は鉛直平面内の非ホロノミック拘束であっても対象物の挙動を理解し、任意の目的位置・姿勢へ協調昇降が可能であることが確認された。

次に、協調運搬における対象物の重量補助について検討を行った。協調運搬における重量補助は、パワーアシスト方式と異なり、直接操作者の力をサポートすることはできない。代わりに、対象物の重心位置からロボット把持点までの距離の関係よりサポートする重量が決まる。ロボット側に全ての重量を支えて欲しい場合は、重心位置にロボットがくるように把持させればよい。また、対象物を傾けたとき、受動的車輪をもつ道具と同様に斜面方向の対象物の重力成分を支えることができず、操作者の負担が増すことが考えられたので、対象物の姿勢によらず重量補助を一定に行うための手法を提案した。実際受動車輪の道具と異なり、ロボットの力センシングから、このような重量補助が可能になることが特徴である。

さらに、水平面内と鉛直平面内の協調運搬手法を組み合わせ3次元空間内の目標位置・姿勢へと協調運搬することを考え、その制御手法の提案と可制御性の証明を行った。人とロボットアームによる協調運搬実験の結果、人はロボットに与えた非ホロノミックの特性を理解し、3次元空間内の任意の位置・姿勢へ協調運搬可能なことが確認された。単車輪と同様の非ホロノミック拘束を与える手法は、人が持つ作業感覚を3次元空間の対象物の

操りにまで応用することができ、人とロボットによる協調運搬手法のインターフェースとして有効であることが明らかになった。