

第4章 移動マニピュレータを用いた協調運搬

4.1 緒言

前章では、第1章「本論文の目的」で挙げた3つのテーマのうち(2)「3次元空間内の協調運搬」を採り上げ、第2章で提案した仮想非ホロノミック拘束を用いる手法を拡張し、3次元空間内の目標位置へ対象物を位置決めする手法の提案を行った。その結果、人はロボットに与えた非ホロノミック拘束を有した挙動を理解し、対象物を3次元空間内の任意の位置・姿勢に運搬可能であることが確認された。しかし、実験装置は床面に固定されているマニピュレータであるため作業領域が狭く、提案手法の実用を考えるには広い作業領域を持つロボットへ導入する必要がある。

固定式マニピュレータの作業領域を拡張する方法として、マニピュレータ自身の腕の長さを伸ばす、もしくは、マニピュレータのベースをX-Yステージとした走行式のシステムが考えられる。これらの方法で作業領域を拡大した場合、全体の自由度が6つ以上あれば、前章までに提案したマニピュレータの制御と同様の手法を用いて3次元空間内の協調運搬を実現することが可能である。しかし、装置の大型化やそれを設置する場所の選定が問題となる。また、施設に固定されているため、一般性が持たせ難い。人と協調作業を行うためのロボットには、人と同等の広域な作業領域を確保し、かつ、一般性のある装置が必要不可欠であると考えられる。

近年、人と協調・共存するためのロボットとして、人が生活する空間内を自由に移動することのできる移動マニピュレータや人と同等の歩行能力を実現し、共同作業を行うことのできる人間型ロボットの開発が進められている[50]。これらのロボットは、フィールド上を自由に移動することのできる能力を有し、マニピュレータのもつ3次元空間内の作業能力を広い作業空間に拡張することを可能としている。

そこで、本章では提案する非ホロノミック拘束を与える協調運搬手法をこれらの移動ロボットへ導入することを考え、第1章「本論文の目的」で挙げた3つのテーマのうち(3)「移動ロボットを用いた協調運搬」を採り上げ、それを実現するシステム構成と提案手法の有効性について検討を行う。

人と移動ロボットによる協調運搬の研究では、複数移動台車が単一物体を支え、人は対象物に力を加えることで協調運搬を行う制御手法が提案されている[39, 44, 45]。また、松下電工が開発したパワーアシストカートなどに見られるように、従来ある台車などの道具に駆動輪を取り付けることで人の重量物の扱いを補助する装置が提案されている[86]。そこで、はじめにマニピュレータを搭載しない移動台車との協調運搬について考え、提案する仮想非ホロノミック拘束を与える手法をどのように適用するか検討する。

次に、移動台車にマニピュレータを備えた移動マニピュレータを用い、3次元空間内の目的位置へ協調運搬することを考える。移動マニピュレータによる作業能力の拡大は数多

くの研究がされている。移動マニピュレータの利点は、移動台車のみでは運搬することのできない3次元空間内の目的位置へ対象物の移動が行えることである。また、移動台車にとって障害物となる机や棚の上に物を運ぶことを考えたとき、移動台車の自由度を利用できない状態であってもマニピュレータの自由度を用いた運搬が可能である。そこで、移動マニピュレータを使った協調運搬へ前章までに提案した仮想非ホロノミック拘束を与える3次元空間内の協調運搬手法を導入することを検討し、一般性を持った手法であることを確認する。

本章で検討する移動マニピュレータの制御手法は、マニピュレータの可搬重量を超えるような重い対象物のときに有効であると考えられる「移動台車主体の制御」と、マニピュレータの可搬重量以内の比較的軽量な対象物のときに有効であると考えられる「マニピュレータ主体の制御」の2つのアプローチを考え、双方の制御手法の有効性を人とロボットによる協調運搬実験により確認する。

4.2 移動台車への非ホロノミック運搬手法の導入

本節で考える移動台車は施設に依存せずに地上を自由に動くことができる機構を考える。地上を移動することのできるロボットは、車輪を有したものから、近年盛んに研究されている脚式の移動機構を備えたロボットなど様々な形式が存在する。

ここで、これらのロボットの動きを大きく2つの種類に分けて考える。1つは車輪がもつ非ホロノミック拘束条件を有した軌道で、平面内の任意の位置・姿勢へ移動することのできるロボット。古くからある移動台車は、車輪の機構をそのまま利用した移動方法であるため、この部類にはいる。他方は、それらの拘束条件がなく、全方向へ自由に移動することのできる全方向移動台車。近年、様々な研究室で開発されている全方向移動機構や脚式の移動ロボットは、この部類にはいる。機構の設計や制御は複雑になるが、移動方向の拘束がないため軌道計画を容易に行うことができる。

分類したそれぞれの方式の移動台車に対し提案する非ホロノミック拘束を与える手法が水平面内の協調運搬手法として導入可能であることを確認する。

非ホロノミック移動台車への導入

まず、非ホロノミック移動台車を、さらに代表的な2つの動きに分類することを考える。1つは、提案手法のアイディアの原点ともいえる猫車や荷車などと同様にその場での旋回が行える機構。つまり、回転中心を移動台車の上に位置させることができるもの。もう1つは、自動車や自転車のように操舵角が決まっておりその場では旋回できない機構。これらは回転中心を移動台車の上に位置させることができない。そして、それぞれの機構に対し非ホロノミック協調運搬手法の導入方法を考える。

はじめに、その場旋回のできる移動台車の例として Fig.4.1 に示すような2輪が独立して駆動できる非ホロノミック移動ロボットを考え、人と協調運搬することを検討する。このような移動台車と協調運搬するとき、運搬対象の片側を移動台車の進行方向と対象物の長軸が並行になるようにし、かつ、車軸との交点に把持点を設けることを考える。つまり、対象物の望む場所へ機構的に非ホロノミック拘束条件を付加することを考える。把持点には力センサが取り付けられているものとし、移動台車の進行方向を X 軸、その車軸方向を Y 軸、把持点周りの回転を ϕ として、前章までに行ってきたように各座標軸に対

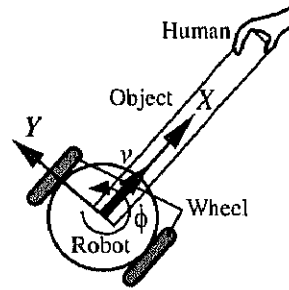


Figure 4.1: Nonholonomic vehicle model with two wheels.

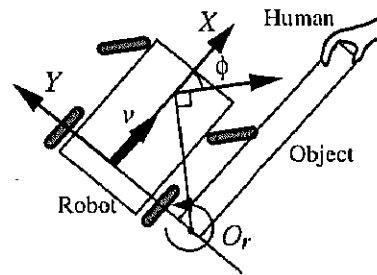


Figure 4.2: Nonholonomic vehicle model like an automobile.

してインピーダンス制御を行う。ここで、 Y 軸方向の運動を考えると、車輪により拘束されおり、移動させることが不可能である。移動可能な方向は、 X 軸方向並進と ϕ 回転方向のみであり、計測される力に対し柔軟に移動できるようにインピーダンス制御を行う。つまり、仮想的な拘束を与えることなく、そのまま非ホロノミック拘束を用いた協調運搬装置として使うことができる。もともとの機構が提案する仮想非ホロノミックと同様の移動方法であるため制御による拘束をせずに機構の拘束条件により第2章で示した協調運搬時の利点を得ることができる。対象物を移動台車に載せ、力制御による車輪の制御を行うことができれば、非ホロノミック軌道を使った協調運搬装置として容易に用いることが可能である。ただし、最初に拘束方向を考慮した対象物の設置を必要とし、拘束位置や方向を変更したいときは対象物の載せ変えが必要となる。人の手に頼らずこのようなことを行いたい場合は、新たな機構を備える必要がある。

一方、その場旋回できない移動台車の例として、Fig.4.2 に示すような前輪操舵後輪駆動型の四輪の移動台車を考える。このような移動機構で操舵角に限界がある場合、その場での旋回ができないため、移動台車の上に回転中心を位置させることができず、直接対象物を載せて単車輪と同等の拘束条件を実現することは不可能である。しかし、操舵輪の据え切りが可能であると仮定し、対象物の把持点を非ホロノミック移動台車の旋回中心上 O_r に位置させることができれば、把持点周りの回転が可能となる。さらに、対象物の長軸を移動台車の車体軸 (X 軸) と並行にすることで、対象物の把持点へ長軸方向に平行な単車輪に相当した非ホロノミック拘束を与えることができる。しかし、操舵角の限界から対象物の把持点を移動ロボットの近くに位置させることができないため、実用的ではない。よって、単車輪の動きをさせつつ、移動ロボットの付近に把持点を位置させるためには、移動ロボット以外の機構が必要となる。

以上より、非ホロノミック移動台車を用いた協調運搬を考えた場合、回転中心を移動ロ

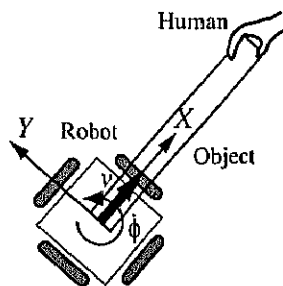


Figure 4.3: Holonomic vehicle model.

ロボット上に位置できる移動台車のみ提案する手法を直接導入することが可能といえる。つまり、もともとのリヤカーや荷車などの移動機構に力制御する方法と何ら変わりのないものとなる。ロボット自身の構造が比較的単純であり、制御も移動体の進行方向と旋回方向のインピーダンス制御を行えば容易に導入が可能である。一方、機構による拘束条件が車軸上に設定されてしまうため、全方向へ動くことのできるインピーダンス制御則を用いる協調運搬は不可能である。もし全方向へ移動させたいときは、移動台車の自由度のほかに更なる自由度を付け加える、もしくは、全方向移動台車を考える必要がある。

全方向移動台車への導入

平面内の任意の方向へ移動できる全方向移動台車を使って、仮想非ホロミック拘束を与える協調運搬を導入する手法について述べる。まず、移動台車の座標系を X - Y と取り、対象物の長軸と X 軸が重なるように台車へ載せることを考える (Fig.4.3)。ここで、仮想的な非ホロミック拘束を実現するために、移動台車座標系に対し各軸に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。

$$\begin{cases} f_{Xr} = m_X \dot{v}_{Xr} + b_X v_{Xr} \\ f_{Yr} = m_Y \dot{v}_{Yr} + b_Y v_{Yr} \\ \tau = i\ddot{\phi} + c\dot{\phi}. \end{cases} \quad (4.1)$$

Y 軸方向のインピーダンス係数を大きく設定することで速度の発生を抑え仮想的な拘束を実現する。また、 X 軸方向と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、台車の旋回する動きに沿って拘束方向が変化する単車輪と同様の非ホロミック拘束を実現することができる。つまり、前章で紹介した手先座標系におけるインピーダンス制御と同様に移動台車座標系における異方性インピーダンス制御で容易に仮想非ホロミック拘束を実現できる。全方向移動ロボットを用いた場合、全ての方向へ移動できるため、仮想的な拘束を自由に定めることができる利点がある。機構による拘束条件は存在せず、制御により拘束を実現することから、任意に拘束方向を変更、解除することが可能である。

以上の方法により、人と移動台車による協調運搬において、第2章で述べた水平面内の協調運搬へ仮想非ホロミック拘束を与えることによる利点を得ることができる。しかし、これらの移動台車を用いた対象物の協調運搬は、移動ロボットが移動できる平面内の場所のみに限られる。また、協調運搬を行うときも、対象物をロボットに載せる作業を人が行う必要がある。よって、床面から対象物を把持し、3次元空間内の目標位置へ協調運搬するためには、床面を移動する機構以外にマニピュレーションの機能が必要である。そ

ここで、次節から人と同等の3次元空間内の作業領域を備える移動マニピュレータによる協調運搬を検討し、提案手法の汎用性を検討する。

4.3 移動台車主体の協調運搬

前節では、移動台車を使った協調運搬へ非ホロノミック拘束を利用する協調運搬手法の導入を検討した。しかし、台車の移動機構のみでは前章で提案した3次元的位置決めを行うことができない。3次元空間内の位置決めを行うためには更なる自由度を持つ必要がある。移動台車が平面内の3自由度に対し可制御であるとき、3次元空間内の位置・姿勢の6自由度を位置決めするには、高さ方向の1自由度とピッチ・ロール姿勢の2自由度を増やせばよい。しかし、移動台車にとって障害物となる机や棚の上に物を運ぼうとしたとき、移動台車の自由度を利用できない場合がある。よって、移動台車が動くことのできない状態でも3次元空間内の6自由度を確保するためには、移動台車の自由度以外に6自由度の機構を有することが必要である。そこで、本節では移動台車に6自由度以上のマニピュレータを備える移動マニピュレータを用いた3次元空間内の協調運搬について検討を行う。

まず、移動台車とマニピュレータの協調制御について考える。移動マニピュレータを用いることで広い作業領域を得る代わりに、移動マニピュレータ特有の問題を解決しなくてはならない。台車は床面に固定されていないため、転倒を回避する制御が必要である。また、台車の移動経路に障害物がある場合、それを回避する行動をしなくてはならない。さらに、それらの行動をしつつ、マニピュレータの可操作性を維持することが要求される。

このような移動マニピュレータの制御を、人の重量物の運搬行動を参考に構築することを考える。人は離れた場所へ重い物を持ち運ぶとき、主に足を使って移動し、そのときの腕の姿勢は対象物を持っていても疲れない、もしくは、力を大きく出すことのできる姿勢に保っている。つまり、腕は主に対象物を保持するために用いられ、足は主に水平面内の移動に使われる。そして目的位置へ最終的な位置決めをするとき、腕を使って対象物を指定の場所へ移動させる。このような移動方法は、人の腕をマニピュレータ、足の動きを移動台車と考えることで、移動マニピュレータの制御においても、マニピュレータの可搬重量に近い重量物を運搬するときに適した移動方法であると考えられる。

障害物のない場所は、移動台車を主体とした水平面内の移動を行い、このときのマニピュレータは対象物の保持と台車ではサポートできない対象物の上下移動や姿勢角の変更を行う。移動台車が障害物へ近づいたとき、移動台車は障害物の回避行動を行い、マニピュレータが対象物の動作を補償する動きへ移行する。このような制御を行うことで、マニピュレータと比べ高出力を出せる移動台車が水平面内の動きを主に担い、マニピュレータは対象物の保持を十分に行うことのできる姿勢に維持することが可能となる。そして、移動台車の自由度が使えない場所へ最終的な位置決めを行うとき、マニピュレータがその作業領域を補助するように動作を切り替えることができる。このような移動マニピュレータの制御手法を「移動台車主体の制御」と呼ぶこととする。

移動台車主体の制御による協調運搬を考えるとき、移動台車の上方に対象物の把持点を位置させることができれば、移動台車の動きが対象物の水平面内の動きとなる。つまり、前節で紹介した移動台車による非ホロノミック拘束を用いた協調運搬が可能になる。しかし、対象物が常に移動台車の真上に位置できるとは限らない。したがって、移動台車の動きだけでマニピュレータの把持点に非ホロノミック特性を再現することは困難である。一

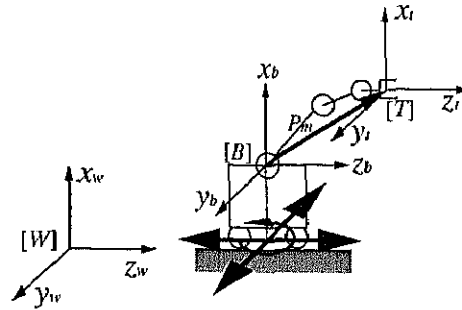


Figure 4.4: Manipulator on the holonomic vehicle.

方、水平面内の非ホロノミック拘束の位置をマニピュレータの把持点ではなく、移動台車の回転中心に固定する方法も考えられる。しかし、回転中心が対象物から離れることは、操作者にとって対象物の挙動が直感的に理解し難くなる。

そこで本節では、非ホロノミック拘束をロボットの把持点に維持しつつ、移動台車の動きを主とした動作で移動マニピュレータを制御する手法として、システム全体の冗長自由度を利用した制御を考える。

4.3.1 冗長自由度を利用した移動マニピュレータの制御

移動マニピュレータの構成を Fig.4.4 に示すように、全方向移動台車と6つ以上の関節をもつマニピュレータからなる冗長自由度を有した装置とする。移動マニピュレータの制御に与えられる入力は、インピーダンス制御により計算されたマニピュレータ手先座標系における並進速度・角速度の6自由度であり、その指令を満たしても3自由度以上の冗長性が残る。この冗長自由度を用いて移動台車の障害物回避やマニピュレータの可操作度[79]維持を実行することで、移動台車を主体とした水平面内の移動が行えるようにする。本節では、移動台車とマニピュレータを1つの系と考え、冗長マニピュレータの制御を応用することを考える。

まず、複数系のヤコビ行列を合成する方法として、Khatib の提案する Macro/Mini-Manipulator systems[20] で用いられた手法を参考に、系全体の自由度を含んだヤコビ行列 J を求める。マニピュレータの関節駆動により発生する手先の並進速度ベクトルを V_T 、回転角速度ベクトルを ω_T 、移動台車の並進速度ベクトルを V_B 、回転角速度ベクトルを ω_B 、移動台車座標系と手先座標系を結ぶベクトルを P_m としたとき、絶対座標系における移動マニピュレータ手先の並進速度 $V_{[W]}$ と回転角速度 $\omega_{[W]}$ は次のように表せられる。

$$\begin{aligned} V_{[W]} &= V_{B[W]} + V_{T[W]} + \omega_{B[W]} \times P_{m[W]}, \\ \omega_{[W]} &= \omega_{B[W]} + \omega_{T[W]}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

(4.2) 式を状態方程式に書き直すと

$$\dot{X}_{[W]} = V_P \dot{X}_{B[W]} + \dot{X}_{T[W]},$$

$$\dot{X}_{[W]} = \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix}_{[W]}, \quad \dot{X}_{B[W]} = \begin{bmatrix} V_B \\ \omega_B \end{bmatrix}_{[W]}, \quad \dot{X}_{T[W]} = \begin{bmatrix} V_T \\ \omega_T \end{bmatrix}_{[W]}, \quad V_P = \begin{bmatrix} I & -\hat{P}_{m[W]} \\ 0 & I \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

$\hat{P}_{m[W]}$ は絶対座標系で表せられるベクトル $P_{m[W]}$ から生成された外積を示し、次式のような関係にある。

$$\begin{aligned} P_{m[W]} &= [x, y, z]^t, \\ \hat{P}_{m[W]} &= \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

絶対座標系における移動台車のヤコビ行列とマニピュレータのヤコビ行列がそれぞれ $J_{B[W]}$, $J_{m[W]}$, 移動台車とマニピュレータの各自由度に対する速度指令が $\dot{\theta}_B$, $\dot{\theta}_m$ で表せられるとき、(4.3) 式は次のように表せられる。

$$\dot{X}_{[W]} = V_P J_{B[W]} \dot{\theta}_B + J_{m[W]} \dot{\theta}_m. \quad (4.5)$$

(4.5) 式では移動台車の指令とマニピュレータの指令は等価に用いられることになる。マニピュレータ、もしくは、移動台車のどちらか一方を優先的に用いた指令を実現したい場合、一方のヤコビ行列に重み係数を乗じ、移動マニピュレータ手先の速度指令に関する式を構成すればよい。ここで、移動台車のヤコビ行列に速度指令に関係した重み係数をかけることを考える。

$$\begin{aligned} \dot{X}_{B[W]} &= J_{B[W]} K_B \dot{\theta}_B, \\ K_B &= \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

k_1, k_2, k_3 は1以下の正数とする。これを(4.3)式に代入する。

$$\dot{X}_{[W]} = V_P J_{B[W]} K_B \dot{\theta}_B + J_{m[W]} \dot{\theta}_m. \quad (4.7)$$

(4.7) 式より、 R_W^T を絶対座標系から手先座標系への変換行列としたとき、手先座標系から見た系全体のヤコビ行列 J は次のように表現することができる。

$$J = R_W^T \begin{bmatrix} V_P J_{B[W]} K_B & J_{m[W]} \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

\dot{X}_t を手先座標系における速度指令、 $\dot{\Theta}$ を移動マニピュレータのもつ全ての自由度に対する速度指令、ヤコビ行列 J の疑似逆ヤコビ行列を J^+ , k を任意定数ベクトルとしたとき、運動学の一般化式は次のように表せられる。

$$\begin{aligned} \dot{\Theta} &= J^+ \dot{X}_t + (I - J^+ J) k, \\ \dot{\Theta} &= \begin{bmatrix} \dot{\theta}_B \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix}, \dot{X}_t = R_W^T \dot{X}_{[W]}, J^+ = J^T (J J^T)^{-1}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

右辺第1項よりマニピュレータ手先座標の速度指令から系全体の自由度に対し速度指令を計算することができるので、前章で用いたマニピュレータを使った制御と同様、手先座標系にインピーダンス制御を行うことで仮想非ホロノミック拘束を実現することができる。重み係数を使用している場合は、移動台車の速度指令に係数行列 K_B が乗じてあることに注意が必要である。また、右辺第2項はゼロ空間行列による指令であり、右辺第1項

で指令したエンドエフェクタの位置・姿勢に干渉することなく、特定の関節へ冗長自由度を使った指令をすることができる。

ここで、移動台車を主体とした水平面内の移動をする、冗長自由度を利用した移動マニピュレータの制御について考える。移動台車主体の制御は、人の運搬行動と同じく、対象物を支えるマニピュレータは最適な姿勢を保ち、水平面の移動を台車部が主に担う手法である。そこで、マニピュレータが最適姿勢を維持するタスクを(4.9)式の任意係数行列 k に与え、残った移動台車の自由度で水平面の移動を行う手法を考える。マニピュレータの最適角度は、システムの転倒回避や可操作度を考慮したマニピュレータの姿勢をあらかじめ与えることとする。ここで、 Θ を各自由度の現在値、 Θ_{ref} を各自由度の目標値、 H をゲイン行列、 k_h をゲイン係数としたとき、

$$\begin{aligned} k &= H(\Theta_{ref} - \Theta) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & k_h I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{Bref} - \theta_B \\ \theta_{mref} - \theta_m \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

として第2項のタスクを与えることで、移動マニピュレータは冗長性を利用し目標関節角度をできる限り実現するような運動をする。マニピュレータの各自由度に対し目標関節角度を与え、移動台車の自由度に対しては目標位置を与えない場合、マニピュレータの関節角を目標角度になるべく保つようにしつつ、移動台車の自由度を主に使いマニピュレータ先端の軌道を生成することができる。

次に、移動台車が障害物に近づいたときを考える。このとき、移動台車は障害物の回避行動を行い、マニピュレータにより手先の軌道を維持する必要がある。そこで、マニピュレータの最適姿勢維持と同様に、ゼロ空間行列を使った移動台車の障害物回避を考える。(4.9)式の第2項へ障害物に対するポテンシャル関数 $V(\theta)$ を与えると次式のようなになる。

$$\begin{aligned} k &= -\xi k_p, \\ \xi &= [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_l], \\ \xi_i &= \partial V(\theta) / \partial \theta_i. \end{aligned} \quad (4.11)$$

k_p は適当な正の定数とする。評価関数 $V(\theta)$ を考えた速度指令を移動台車の自由度のみに与えることで、マニピュレータの冗長自由度を使い、手先の軌道に非干渉で移動台車の障害物回避行動が行える。このとき、マニピュレータを最適姿勢に保つ(4.10)式の指令より移動台車が障害物を回避するための動きを優先するという条件を満たすように選ぶことで、障害物付近の移動台車が進入できない場所では移動台車が停止し、マニピュレータが作業領域を補償するように移動することができる。

4.3.2 非ホロノミック移動台車を備えた移動マニピュレータの制御

これまでは、移動台車の動きを並進2自由度と回転1自由度を備えた全方向移動台車を想定して制御則を議論してきた。しかし、一般性を持った制御手法として非ホロノミック移動台車にも導入できることが望ましい。そこで、非ホロノミック移動台車を備えた移動マニピュレータに本制御則を導入するときの手法について検討する。まず、非ホロノミック移動台車は、同一車軸上に本体をはさみ左右に2つの車輪を備え、独立に制御できる機構を想定する。つまり、移動台車の上方へ回転中心が位置できる非ホロノミック移動台車を考え、単車輪と同様の動きができるものとする。

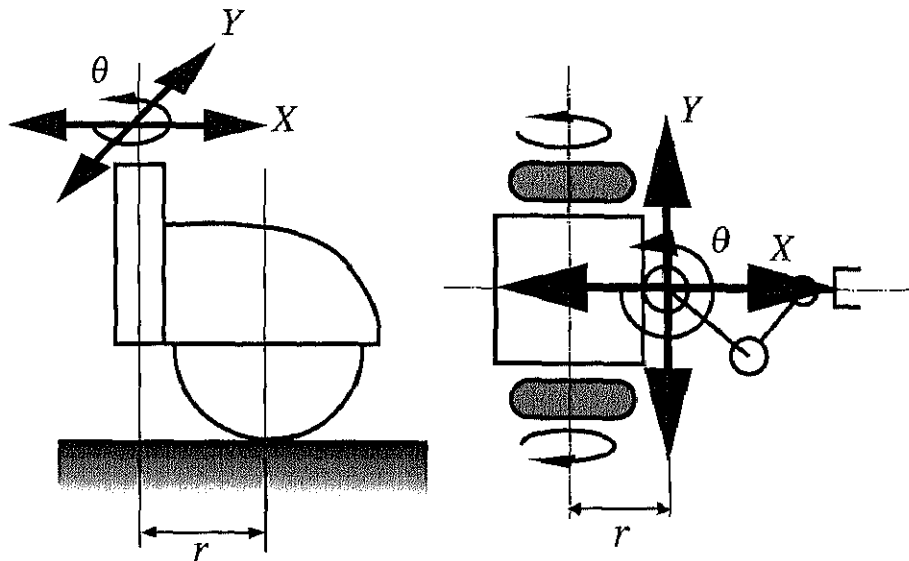


Figure 4.5: Nonholonomic mobile manipulator with caster action.

ここで、Fig.4.5に示すような、オフセットを持つ車輪を模倣した制御を考える。車輪を支える軸と車輪の接地点にオフセットをもつキャスト機構は床面と接する車輪の部分は非ホロミック拘束を受けているにもかかわらず、上部に繋がる軸の部分の移動は平面内の X 、 Y 方向、車軸の θ 回転の全方向へ移動することができる。非ホロミック移動台車を用いる場合も、移動台車のマニピュレータ取り付け位置を非ホロミック移動台車の車軸上からずらした位置へ取り付けることができれば、オフセットを持つ車輪の特性で非ホロミック移動台車へ速度指令ができる。

非ホロミック移動台車の場合、オフセット車輪の機構と異なり、マニピュレータの取り付け面に回転する機構を備えていない。そこで、移動台車に回転機構を取り入れる方法が考えられる。一方、移動台車に取り付けたマニピュレータの第1関節の回転軸がキャストという取り付け軸と重なっている場合、移動台車の取り付け軸が回転するべき回転角をマニピュレータの第1軸へ与え、マニピュレータが本来動くべき回転角と合成した指令を行えばよい。第1関節の回転軸が取り付け軸と重なっていない場合、マニピュレータが6自由度持つと仮定しているので、移動台車が旋回しなくてはならない回転角により移動してしまう手先の位置を修正するようにマニピュレータを制御する必要がある。

以上のような制御手法を考えることで、オフセット車輪と同様の動きをさせることが可能であり、(4.9)式で計算された全方向移動台車への速度指令を、一部の非ホロミック移動台車であるが、そのまま指示することができる。

4.3.3 検証実験

移動台車を主体的に用いる移動マニピュレータの協調制御手法を使い、マニピュレータのみでは持ち運ぶことのできない長距離の運搬や移動台車のみでの移動機構では障害物となって運搬することのできない机や台の上に対象物を持ち運ぶ実験を行い、移動マニピュレータがその運搬を実現するための手法として有効に機能することを確認したので、その状況を説明する。

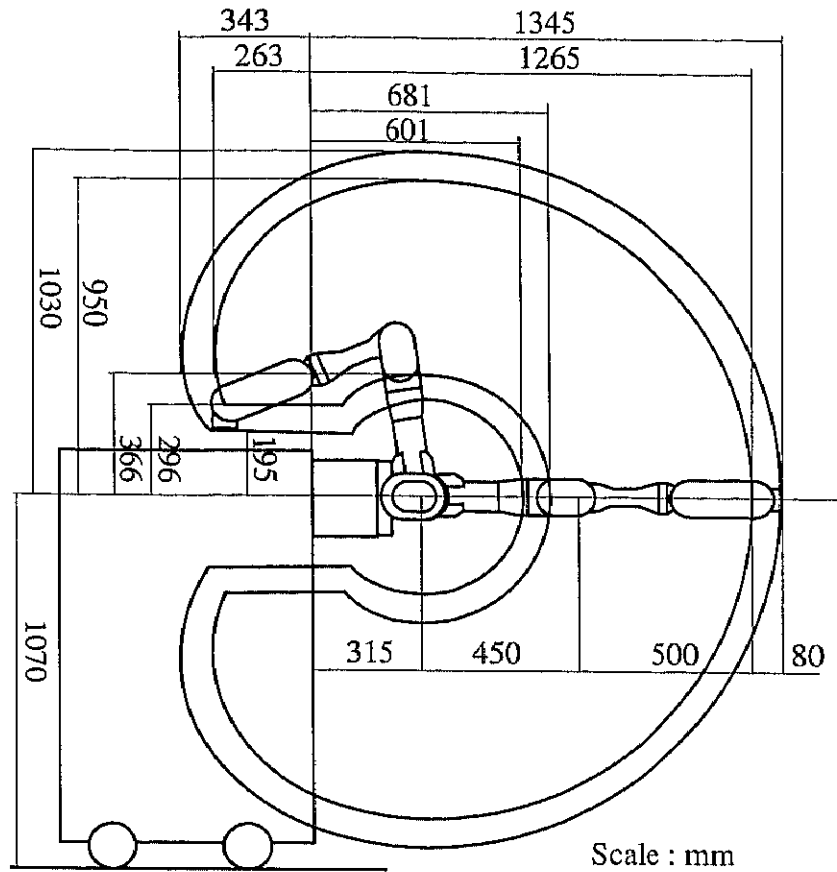


Figure 4.6: Size of mobile manipulator.

実験で使用する装置は前章までに扱ってきた7自由度を有する汎用ロボットアーム（三菱重工，PA-10）に全方向移動機構を備えた移動台車を搭載した移動マニピュレータを考える。マニピュレータと移動台車の構成を Fig.4.6 に示す。移動台車の側面にマニピュレータが装着される構成になっており、高い位置での可操作度も十分保てる構成になっている。全体写真を Fig.4.7 に示す。移動マニピュレータの手先には6軸力/トルクセンサを備え、その先に軽量・軽把持力の電動グリッパを設けてある。コントローラーには PentiumIII 1GHz の PC/AT 互換機を使用する。

移動マニピュレータの制御 OS には、「RTLinux」を用いる。RTLinux は LAN での通信により遠隔操作が簡単に行え、複数のリアルタイムプロセスを複数ウィンドウで同時に実行することができる。移動マニピュレータへの制御指令は、TCP/IP 上のソケットインターフェースを利用してサーバ型のプロセスにより通信をする方式をとり、ASCII 文字列を使ったコマンドを使うことで機種依存性を排除した構成とする。移動台車に搭載された RTLinux と通信するコンピュータは Linux を用い、ソケット通信により取得した移動マニピュレータの情報を提示させる。

実験に用いる移動マニピュレータには実空間内にある障害物を認識するための超音波センサや赤外線センサ等の外界認識センサを備えていない。そこで、仮想空間内に既知障害物を構成し、移動台車とその既知障害物に近づいたとき、移動台車の周りに構成するポテンシャル場により回避行動をとる方式を考える。仮想空間のマップは、移動マニピュレータの制御コンピュータに与えるものとする。

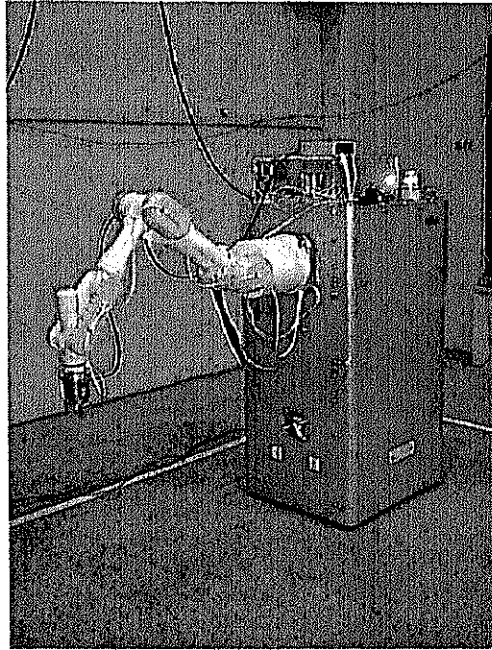


Figure 4.7: Mobile manipulator(photo).

システムの全体構成を Fig.4.8 に示す. RTLinux による制御周期を 2ms とし, マニピュレータの速度サーボへの指令と移動台車への速度指令の書き込みを行う. 移動台車との通信は共有メモリを用い, 共通のアドレスに速度指令を書き込むことで移動台車の MPU が値を読み取り速度サーボへの指令を行う. 移動台車は上位から台車への運動指令を 10ms 毎に取り込み, 台車から上位への制御状態は 50ms 毎に更新する.

マニピュレータ手先への速度指令は, 前章までに行ったマニピュレータ手先座標系におけるインピーダンス制御で与えられる速度指令を (4.9) 式に代入するだけで良い. 目標とするマニピュレータの最適関節角は制御開始時の関節角とし, それぞれ $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7) = (0, 35, 0, -85, 0, -40, 0)$ [deg] とした. ゼロ空間行列を使った速度指令でマニピュレータの初期関節角度をできるだけ維持するように制御を行う. 移動台車の周囲には障害物が検出できる装置が備わっていると仮定し, 仮想空間内に設置された障害物を回避するように制御を行う. 移動台車を中心に半径 0.7m の円内に障害物が進入した際, 回避行動をとるようにより, (4.11) 式の評価関数を進入時からの距離にゲインを乗じた項を考え, 移動台車が障害物から離れる方向へ速度指令を発生するように設定する. 実験時に用いるインピーダンス係数とマニピュレータ初期角度へのフィードバックゲイン, 障害物回避のためのゲイン, 移動マニピュレータのヤコビ行列の重みを次のように定めた.

$$\begin{aligned} m_x &= 5.5\text{kg}, b_x = 20\text{kg/s}, m_y = m_z = 100\text{kg}, b_y = b_z = 5000\text{kg/s}, \\ i_x &= i_y = i_z = 5.5\text{kgm}^2, c_x = c_y = c_z = 20\text{kgm}^2/\text{s}, \\ k_h &= 0.5, k_p = 1000, k_1 = k_2 = k_3 = 0.15. \end{aligned} \quad (4.12)$$

まず, 移動マニピュレータが障害物の近くへ来たとき, 移動台車主体の動きからマニピュレータの動きで作業領域を補う動きへ変遷する様子を計測した. 運搬する対象物は重さ 4.5kg, サイズ 410×410×1000mm のダンボール箱とし, 一端にグリッパが把持できるようにアルミニウム製角パイプを取り付けた. この対象物を Fig.4.9 に示すように, 初期

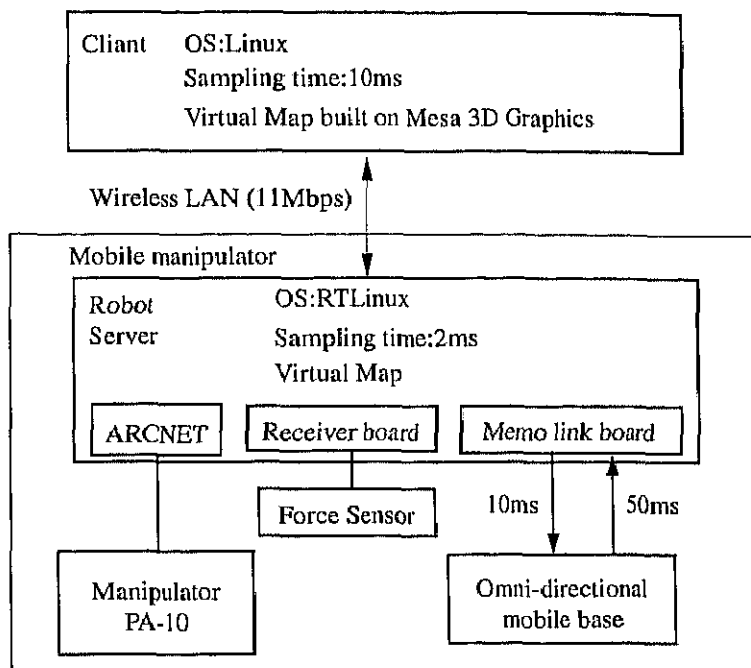


Figure 4.8: System components.

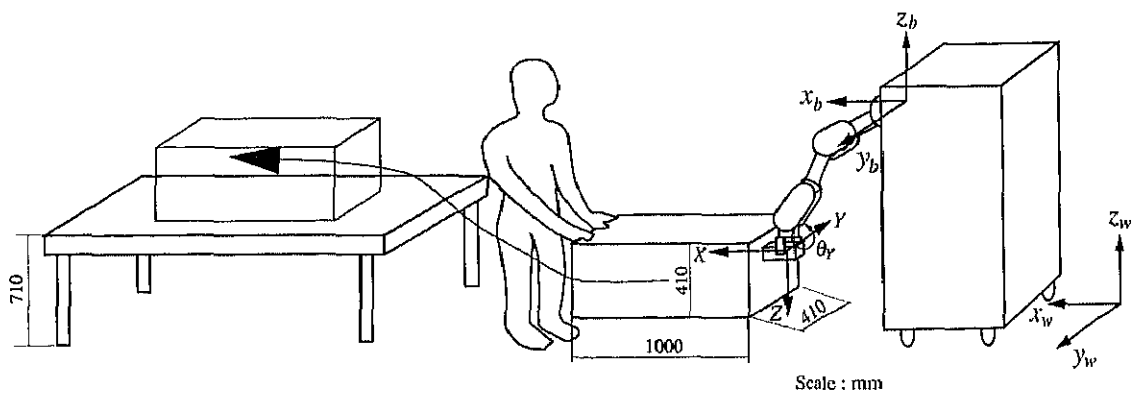


Figure 4.9: Experimental setup.

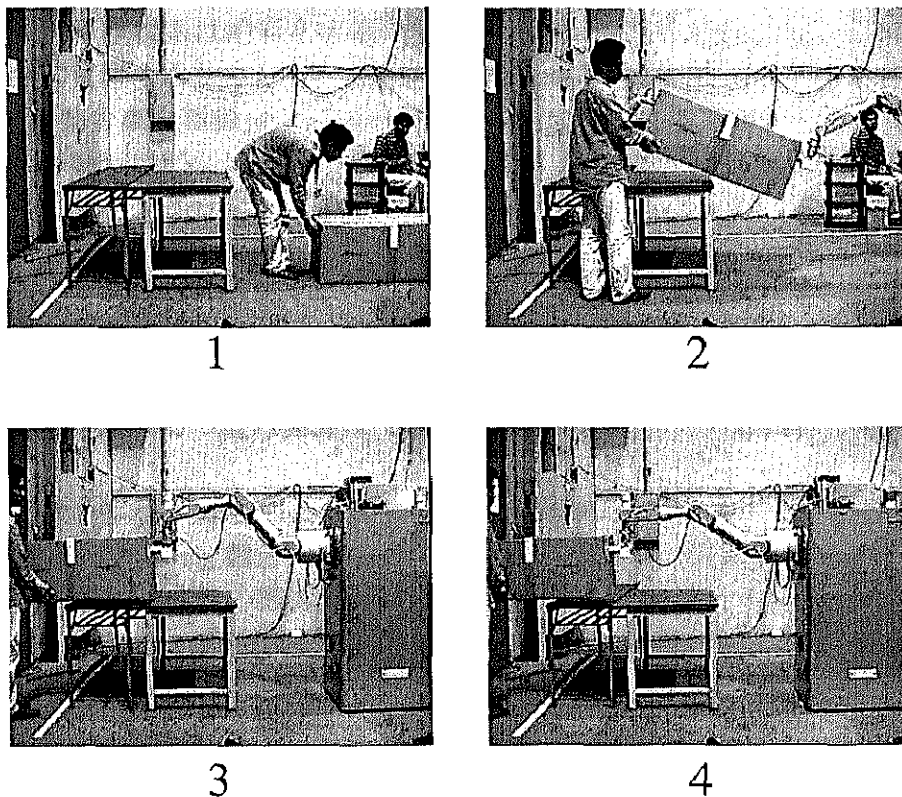


Figure 4.10: Transportation from the floor onto the desk (photos).

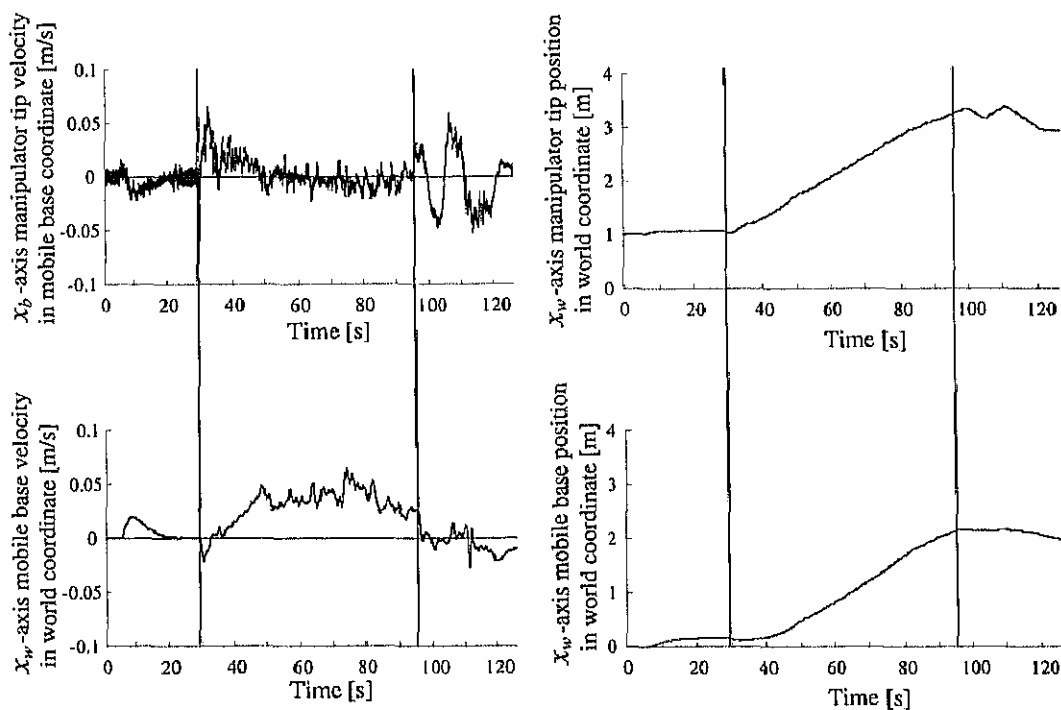


Figure 4.11: Trajectories and velocities.

位置から絶対座標系の x_w 軸上の正方向にある机の上に持ち運ぶことを考える。初期位置における移動台車座標系は絶対座標系の姿勢と平行かつ原点が $(x_w, y_w, z_w) = (0.00, 0.00, 1.07)$ [m,m,m] に位置するものとする。操作者はLinuxを搭載したノートパソコンを携帯し、無線LANで移動台車の制御コンピュータと通信をすることで制御モードの指令を行う。

はじめに、移動マニピュレータの手先座標系に3次元空間内の6自由度全てに動くことのできる等方的なインピーダンス制御を行い、操作者はマニピュレータ先端のグリップを掴み、対象物の把持点まで誘導する。電動グリップはノートパソコンから開閉の指令を行うことができ、対象物の一端をマニピュレータに把持させた後、操作者は他端へ移動し対象物を向い合せて把持する。その後、制御モードを協調運搬モードに切り替え、仮想非ホロミック拘束を与えたインピーダンス制御により目標位置までの移動を行う。また、今後3章で提案した対象物の重力補償は、電動グリップの把持力の限界から用いないものとする。

協調運搬実験の連続写真を Fig.4.10 に示す。実験時の移動台車の回転移動が微小であったため、絶対座標系の x_w 軸方向の軌道で移動マニピュレータの動作を確認する。マニピュレータ先端と移動台車の絶対座標系における x_w 座標位置、マニピュレータ先端の移動台車座標系における x_b 軸方向速度、移動台車の絶対座標系における x_w 軸方向の速度を Fig.4.11 に示す。移動台車座標系からみたマニピュレータ先端の動きは、マニピュレータの関節角の駆動による動きであるので、移動台車の絶対座標系における動きと比較することでどちらの速度指令が優先的に用いられているか判断することができる。実験の計測は操作者がマニピュレータの先端を対象物の把持位置まで誘導するところから始めているため、30秒付近までは対象物への接近動作となっている。マニピュレータの速度指令と移動台車の速度指令を比較すると、30秒以降の協調運搬開始から95秒付近までは移動台車の速度指令がマニピュレータの関節角駆動による速度指令よりも大きな値を示していることから、移動台車を主体的に使った移動をしていることが確認できる。95秒以降、移動台車は机と衝突しないように移動速度を抑え、その代わりにマニピュレータの速度指令を主体として対象物の移動を行っている。この結果より、提案手法は人の重量物を運ぶ行動と同様に、障害物の無い目的位置までの長距離移動を人の足にあたる移動台車で主に移動し、目的位置付近の移動台車が進入できない場所では人の腕にあたるマニピュレータがその作業領域をサポートする動きを実現できていることが確認された。

Fig.4.12 に、マニピュレータ手先座標系 Z 軸方向に計測される力センサの値とマニピュレータ手先のピッチ角 θ_Y の値を示す。マニピュレータ手先座標系 Z 軸方向には非ホロミック拘束がされているため、計測される力はそのまま対象物を支える力となる。ピッチ角の変化により Z 軸方向に計測される力が変化していることが確認される。最大傾斜約 0.52rad が計測されたとき力センサの値は約 20N を示し、対象物の姿勢が水平に近づくにつれて力センサの値が上昇している。対象物の姿勢がほぼ水平になっている95秒時点の力センサの値は約 24N であり、最大傾斜角をとったときと約 4N の差が表れている。傾斜角が大きくなるほどマニピュレータの対象物を支える力が小さくなることが明らかであり、そのための対策として前章で提案した並進力による対象物の重量の補助をエンドエフェクタの把持力を考慮して設計する必要があると考えられる。

次に、対象物を重さ 8.5kg 、サイズ $425 \times 880 \times 1330\text{mm}$ のダンボール箱に変更し、机の横へ位置決めする実験を行った。今回は対象物を大きなものにしたため、机上への持ち運びは考えず、床面への位置決めを行わせた。初期位置と目標位置の関係を Fig.4.13 に示す。被験者は20代の男性3名と20代の女性1名である。対象物の動きを十分説明した上

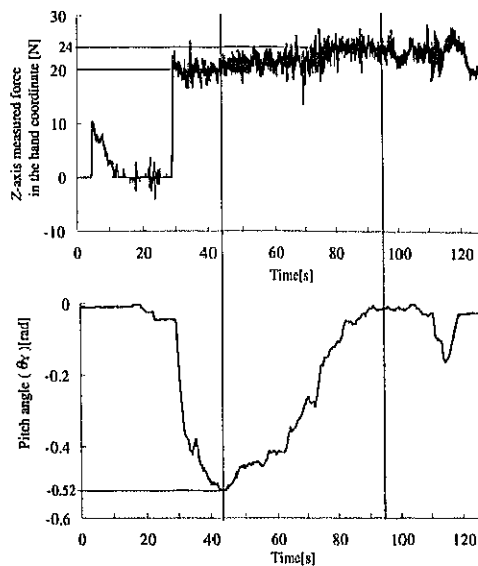


Figure 4.12: Support force and pitch angle.

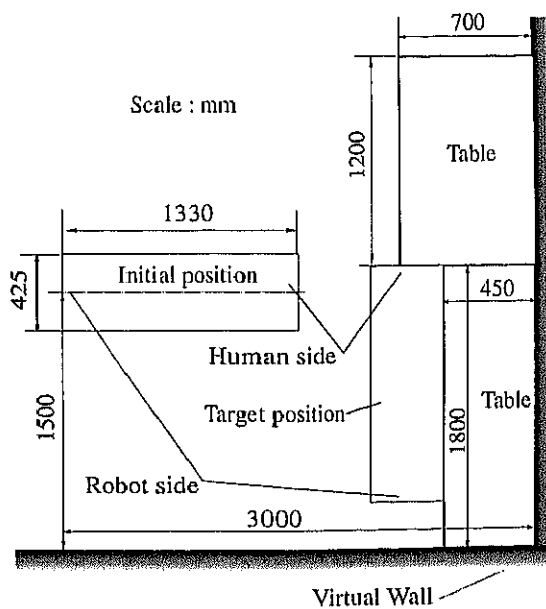


Figure 4.13: Target position and initial position.

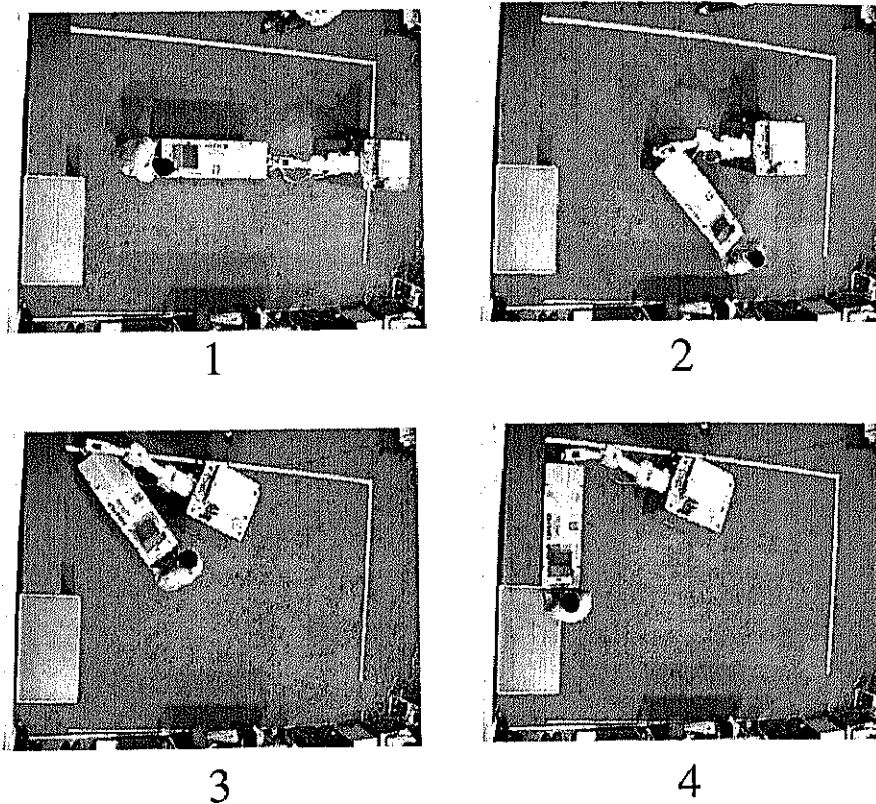


Figure 4.14: Transportation to the corner (photos).

で練習無しに計測を行った。そのうちの一人の実験結果を示す。

Fig.4.14 は運搬中の連続写真，Fig.4.15 は初期位置から目標位置までの操作者，マニピュレータ先端，移動台車の各位置の軌道を表す。水平面内の並進移動は，マニピュレータの関節角を理想の姿勢へ保つように制御することで，移動台車を主体とした移動が行われる。一方，対象物の水平面内の姿勢については，移動台車の移動を主に使用した姿勢の変化を行うには，マニピュレータ手先を中心とした旋回運動をする必要がある。しかし，マニピュレータ先端から移動台車までの距離が若干離れる構造であるため，そのような旋回運動は危険である。そこで，水平面内の姿勢は主にマニピュレータの自由度を使った制御がされるように(4.6)式のヤコビ行列の係数を設定してある。目標位置付近では仮想的な壁が設定してあるので，移動台車は壁に衝突しないように一定の距離を保ちつつ，エンドエフェクタ部の非ホロノミック拘束条件を維持し，目標位置までの移動を行っている。

対象物の目標位置は壁2面に囲まれたコーナーに位置する場所であるので，まず操作者はロボット側の把持部を目的位置へ向ける旋回行動をとり，進行方向の前方にロボットの把持点が位置するようにしている。その後，ロボット側の非ホロノミック拘束された点を先に目的位置へ位置決めし，最後に操作者の把持点を目的位置へ移動させるという行動をとった。長尺物の端点を1つずつ位置決めするこのような行動は，ロボット側の端点が拘束されているためにできる行動である。非ホロノミック拘束されたロボット側把持点は人の意図に反した動作をしないため，操作者はロボット把持点から目を離して操作者把持点のみの位置決めに専念することができる。被験者全員が同様の行動をとったことから，上記のような壁寄せの運搬における本手法の利点は一般性のあるものであると考えられる。

Fig.4.16 はマニピュレータ手先座標系 Z 軸方向の力センサの計測値とマニピュレータ

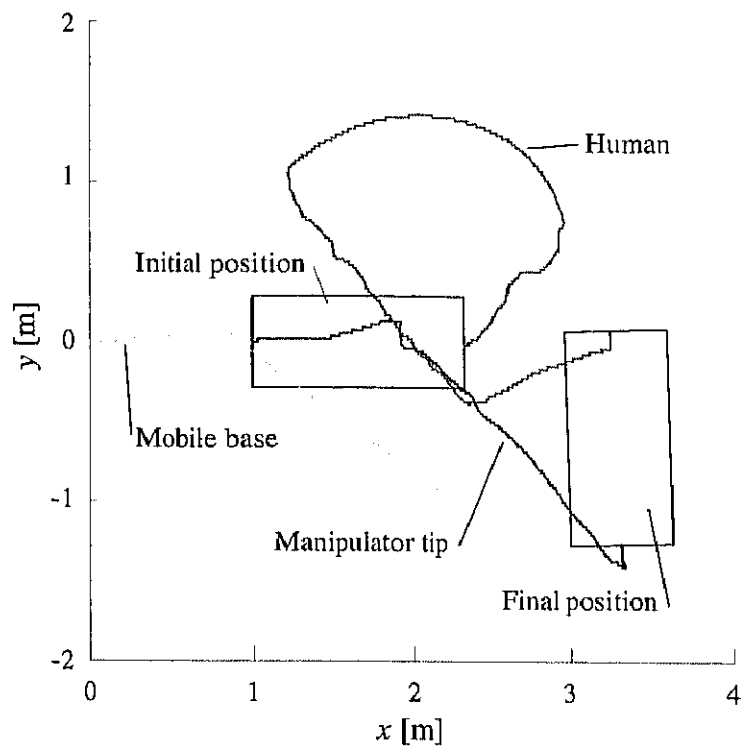


Figure 4.15: Experimental result (trajectories).

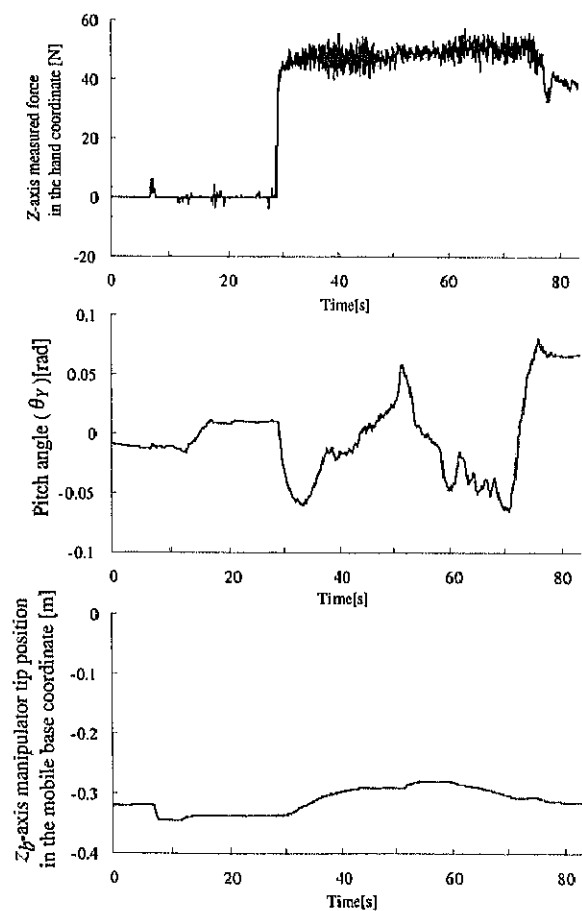


Figure 4.16: Support force, pitch angle and height.

先端のピッチ角 (θ_y)、移動台車座標系 Z_b 方向の高さを表す。対象物の重量の補助は約 47N (=4.8kg) をほぼ定常的にサポートしていることが確認される。対象物の高さは目標位置でほぼ床面へ到達できているが、マニピュレータ側が若干浮いているため、マニピュレータのピッチ角が水平から約 0.07rad 傾いており、 Z 軸方向へ計測される力もゼロには戻っていない。

以上、提案する移動台車主体の制御手法を使い、対象物までのアプローチ、把持、そして、人とロボットが協調して運搬するという一連の作業が、移動マニピュレータを用いて実現可能であることを確認した。また、前章で提案した仮想非ホロノミック拘束を用いた手法は、机の上や部屋の隅へ運搬するという実際の作業に対しても、有効であることが示された。

4.4 マニピュレータ主体の協調運搬

前節での移動台車を主体とした動きに対し、マニピュレータを主体とした動きをすることで、移動台車の移動量をなるべく少なくする制御手法が考えられる。これまでの移動マニピュレータの研究では、移動マニピュレータの安定性とマニピュレータの作業性に重点がおかれ、常にシステム全体が動きつづけることで理想の状態を保つ手法が提案されている [5, 20, 87, 88, 90, 91]。たとえば、システム全体の重心位置を常にある安定な場所へ位置するように移動台車を制御する定重心制御は、移動台車を常に動かすことでシステムを転倒から防ぐことができる。しかし、台車を主体にした動きは移動台車と床面との滑りによる位置決め誤差が大きく、動きの応答性の面でもマニピュレータのみの動きと比べ劣る。つまり、移動台車の動作が頻繁に必要な制御を用いると搭載されているマニピュレータ先端の移動の誤差だけでなく、システム全体のレスポンスにも影響する。また、台車が移動するという事はシステム全体が動くことになるので、その近くで作業をする人へ危害を与える危険性もそれだけ増えることになる。これらのことを想定した移動マニピュレータのパスプランニングをすることは人の動作をロボットが予測しなくてはならないので非常に難しい。これらの問題は、移動マニピュレータを人とロボットによる協調運搬に用いるときリアルタイムで解析していく必要がある。

重量物の運搬を補助する移動マニピュレータは、通常システムの転倒の危険性をさけるためにベース部の台車の重量が重い設計になると考えられる。このような構成のシステムの場合、マニピュレータの先端で対象物を把持し移動させるとき、ある程度の作業範囲であればシステム全体の安定性やマニピュレータの可操作性が十分保たれる場合がある。把持する対象物が軽くなるほど、その範囲は広がる。そこで本節では、マニピュレータの可搬重量と比べて比較的軽量である対象物を持ち運ぶ場合を想定し、移動マニピュレータの制御でなるべく移動台車の動かないような手法で前述の問題を解決することを考える。前節の移動台車主体の制御に対し、本節で提案する制御手法は、「マニピュレータ主体の制御」と呼ぶこととする。

具体的には、システムがある値以上の安定性を保っている場合は移動台車を動かすことなくマニピュレータのみで作業を遂行し、システムが安定性を崩しそうになったとき移動台車が安定性を回復するように移動する手法を検討する。移動台車が動く指標は、安定性に限らず、可操作性やマニピュレータの特異値、関節角のリミット、マニピュレータ先端の加速度などを考慮し柔軟に設計を行う必要がある。本節の検証実験では、最小限の指標としてシステムの重心位置と可操作性を考えた作業領域を設定し、その領域外をマニピュ

レータの先端が超えるときのみ移動台車が移動しシステムの安定を計る手法の実験を行い、提案手法の有効性を確認する。

4.4.1 並進移動の制御則

マニピュレータ主体の動きで協調運搬を行う手法として Lee が提案する移動マニピュレータの制御手法がある [92]。提案手法は、移動台車を動かさなくても安定性を維持しながらマニピュレーションが行えるときは、マニピュレータのみで作業を行い、安定性が悪くなったり、マニピュレータの先端が作業領域を越えようとしたとき、移動台車はその安定性や作業領域を保つために移動を行う方法である。この手法はパワーアシスト装置の作業範囲を広める目的で提案されたため、エンドエフェクタ付近のハンドルに操作者が力を加えることを前提としている。マニピュレータの先端が最適作業領域の境界を超えようとしたとき、マニピュレータは仮想的な反力を操作者にフィードバックすることで移動台車の動作タイミングを知らせる方法をとる。この手法を人とロボットによる協調運搬に用いることを考えた場合、長尺物の長軸方向への反力は人が直接反力を知ることができるが、鉛直方向の反力は操作者に伝わり難く、さらにその反力によって逆らって移動させることも難しい。反力による動作タイミングを知らせることなく移動台車の制御を行えばこのような問題は無いが、移動台車の動作するタイミングがわからず突然動き出すことは近くで操作する人に危険であると考えられる。しかし、前章までに提案した仮想非ホロノミック拘束をマニピュレータ手先に与える手法を用いる場合、反力を直接知ることのできる長軸方向の並進移動のみ使用するため提案手法をそのまま使うことができる。

まず、移動マニピュレータに搭載されたマニピュレータへ最適作業領域の設定を考える。本節の最適作業領域の設定には移動マニピュレータの重心位置とマニピュレータの作業領域を考慮して決定するものとする。まず、移動マニピュレータはシステムの転倒を防ぐため、重心位置を車輪と床面の接地点を頂点とした多角形の内に位置させる必要がある。そこで、マニピュレータ先端の位置に対する移動マニピュレータ全体の重心位置を計算し、その結果から安定性が保たれる領域を選定することで、マニピュレータが安全に作業できる安定領域を決定する (Fig.4.17)。次に、作業領域をマニピュレータの特異値や関節角リミットを考慮して決定する。この安定領域と作業領域の双方を満たした領域を最適作業領域として決定する [89]。マニピュレータの先端がこの最適作業領域内に位置しているとき、

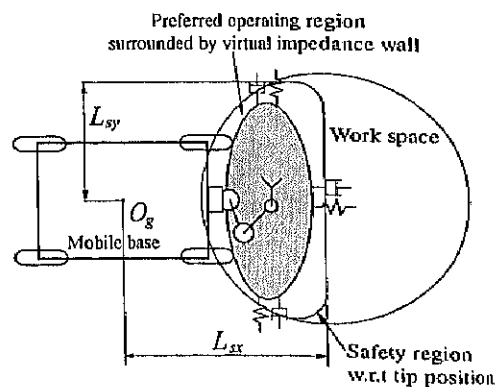


Figure 4.17: Preferred operating region design.

システムは転倒の危険性から守られ、さらにマニピュレータの可操作性が十分満たされている状態である。

ここで、移動台車の並進移動の制御手法として、仮想インピーダンス壁で最適作業領域を囲む手法を提案する。提案手法は、マニピュレータ先端位置に対しての最適作業領域をバネとダンパーで構成された仮想インピーダンス壁で囲い込み、マニピュレータの先端位置がこの領域の境界に到達したとき、仮想壁からの反力を受けるように移動台車とマニピュレータの双方にインピーダンス制御を行う手法である。まず、マニピュレータの先端の位置が最適作業領域の内側にあるとき、移動台車は動かず協調運搬はマニピュレータのみの動きで行われる。このときの制御モードをモードAとする。次に、マニピュレータの先端位置が最適作業領域の境界線上に達したとき、マニピュレータは仮想壁からの反力を操作者に返し、手先の位置が最適作業領域を超えようとしていることを認識させる。このときの壁から反力を返す制御モードをモードBとする。移動台車はモードBのときも動かずマニピュレータのみの動きで協調運搬を行う。もしマニピュレータの先端位置が最適作業領域内へ戻った場合、制御モードはモードBからモードAへと戻る。しかし、操作者が仮想壁からの反力に抗してさらに作業領域外へとマニピュレータの先端を移動させようとしたとき、移動台車はマニピュレータの作業性を回復するように移動を始める。このときの制御モードをモードCとする。モードCでは、移動台車はマニピュレータ先端の位置と移動台車との距離が制御開始時と同じ距離になるまで移動を続け、距離が元に戻ったとき移動台車は動きを止め制御モードをモードCからモードAへと移行させる。移動台車はモードCのときのみ移動する。

提案する制御則を実現するために、Fig.4.18に示すようなマニピュレータの先端位置と移動台車を仮想的なバネとダンパーで繋いだモデルを考える。このモデルのダイナミクスを再現するように移動台車とマニピュレータに次式の特性を満たすインピーダンス制御を行う。

$$\begin{cases} M_h \ddot{x}_h + D_h \dot{x}_h \\ + (D_{bh} \dot{x}_m + K_{bh} (|x_m| - |L_0|) \frac{x_m}{|x_m|}) T_b^h = F_s \\ M_b \ddot{x}_b + D_b \dot{x}_b \\ - (D_{bh} \dot{x}_m + K_{bh} (|x_m| - |L_0|) \frac{x_m}{|x_m|}) = F_\alpha (|x_m|) \\ I_h \ddot{\theta}_h + C_h \dot{\theta}_h = \tau_s \end{cases} \quad (4.13)$$

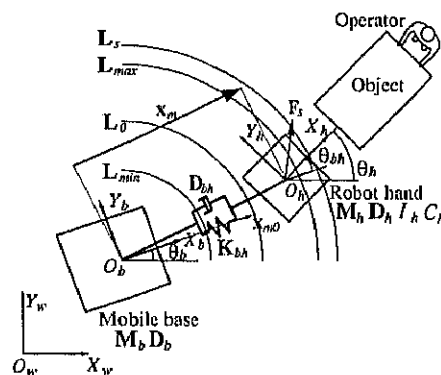


Figure 4.18: Dynamic model of mobile manipulator.

$$\begin{aligned} M_h &= \begin{pmatrix} M_{hx} & 0 \\ 0 & M_{hy} \end{pmatrix}, M_b = \begin{pmatrix} M_b & 0 \\ 0 & M_b \end{pmatrix}, \\ D_h &= \begin{pmatrix} D_{hx} & 0 \\ 0 & D_{hy} \end{pmatrix}, D_b = \begin{pmatrix} D_b & 0 \\ 0 & D_b \end{pmatrix}, \\ D_{bh} &= \begin{pmatrix} D_{bh} & 0 \\ 0 & D_{bh} \end{pmatrix}, K_{bh} = \begin{pmatrix} K_{bh} & 0 \\ 0 & K_{bh} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

ここで、添字 b と h はそれぞれ移動台車座標系とマニピュレータ手先の手先座標系を表す。行列 M_h , M_b , D_h , D_b は慣性行列と摩擦行列。行列 K_{bh} と D_{bh} は移動台車とマニピュレータ先端を結ぶ剛性行列と摩擦行列。係数 I_h と C_h は O_h 点周りの慣性モーメントと回転摩擦係数。行列 T_b^h は移動台車座標系からマニピュレータの手先座標系へと変換する座標変換行列。 $\ddot{\mathbf{x}}_h$, $\ddot{\mathbf{x}}_b$, $\dot{\mathbf{x}}_h$, $\dot{\mathbf{x}}_b$ は加速度ベクトルと速度ベクトル。 $\ddot{\theta}_h$, $\dot{\theta}_h$ は O_h 点周りの角加速度と角速度。 \mathbf{x}_m , $\dot{\mathbf{x}}_m$ は移動台車座標系における移動台車の位置 O_b からマニピュレータ先端の位置 O_h までの位置ベクトルと速度ベクトル。 \mathbf{F}_s はマニピュレータ手先に取り付けられた力センサが計測した手先座標系における力ベクトル。 L_{max} , L_{min} は移動台車からマニピュレータ先端までの距離に対するマニピュレータの最適作業領域の最大距離と最小距離とし、安全領域の境界 L_s 以内に定義される。 L_0 は移動台車 O_b からマニピュレータ先端位置 O_h までの距離の初期値。 $\mathbf{F}_\alpha(|\mathbf{x}_m|)$ は移動台車を床面に固定させるための摩擦力とする。

提案手法を実現するために、剛性係数 K_{bh} を Fig.4.19 に示すような非線形特性をもたせる。また、摩擦係数 D_{bh} の値は移動台車が動くモード C のときのみある一定値をもつように設定する。まず、移動台車とマニピュレータ先端までの距離が $|L_{min}| < |\mathbf{x}_m| < |L_{max}|$ をみたすモード A のとき、剛性係数を 0 とし移動台車へ速度指令が発生しないようにする。そうすることで、移動マニピュレータはあたかも床面に固定されたマニピュレータのように振舞う。このとき、(4.13) 式のバネの剛性係数とダンパーの摩擦係数を (4.14) 式のように与える。

$$\begin{cases} K_{bh} = 0, D_{bh} = 0 \\ \ddot{\mathbf{x}}_b = 0, \dot{\mathbf{x}}_b = 0, \mathbf{F}_\alpha(|\mathbf{x}_m|) = 0. \end{cases} \quad (4.14)$$

次に、移動台車座標系のマニピュレータ先端 $|\mathbf{x}_m|$ が $|L_{max}|$ 以上、もしくは、 $|L_{min}|$ 以下になったときを考える。このとき、制御モードはモード B となり、操作者は仮想壁から剛性係数 K_d に従った反力を感じることができる。仮想壁からの反力を操作者に知らせることで、最適作業領域の外側にマニピュレータの先端位置が移動しようとしていることを警告する。操作者は反力による警告を認識することで、移動台車の制御モードがモード C へ移行し動き始める前に対象物の操作を遅くし、移動台車の急激な発進を避けることができる。このとき、(4.13) 式のバネの剛性係数とダンパーの摩擦係数は (4.15) 式のように与えられ、移動台車はまだ動かず、マニピュレータの動きのみで協調運搬の動きを実現する。

$$\begin{cases} K_{bh} = \frac{|\mathbf{x}_m| - |L_{max}|}{|\mathbf{x}_m| - |L_0|} K_d, D_{bh} = 0 \\ \ddot{\mathbf{x}}_b = 0, \dot{\mathbf{x}}_b = 0, \mathbf{F}_\alpha(|\mathbf{x}_m|) \neq 0. \end{cases} \quad (4.15)$$

モード B の状態で、反力に従ってマニピュレータ先端の位置を最適作業領域に戻した場合、制御モードはモード B からモード A へと再び戻る。しかし、操作者がさらに反力の

ある方向へ力を加え、仮想バネによる反力の絶対値が閾値 α_{fr} よりも大きくなった場合、バネの特性はモードCへと切り替わり、移動台車が動くことでシステムを再び安定な状態に保つようにする。モードCのバネの特性を(4.16)式のように設定し、移動台車は(4.13)式の本ネとダンパーで構成されるダイナミクスに従って移動する。

$$\begin{cases} K_{bh} = \frac{K_d \alpha_{fr}}{\alpha_{fr} + K_b(|L_{max}| - |L_0|)}, D_{bh} = D_b \\ \ddot{x}_b \neq 0, \dot{x}_b \neq 0, F_\alpha(|x_m|) = 0. \end{cases} \quad (4.16)$$

モードCでの移動台車の動きで、移動台車とマニピュレータとの距離 $|x_m|$ が $|L_0|$ となったとき、バネの特性は再びモードAへと戻り、移動台車はその場で動きを止めマニピュレータのみの動作となる。このように仮想的なインピーダンスの壁を制御コンピュータ内に構成することにより移動台車とマニピュレータの協調制御を実現する。

4.4.2 回転移動の制御則

Leeの提案する並進移動に加え、移動台車が回転移動するための制御手法を提案する。もし、移動台車が回転運動をせずに並進移動のみの制御手法で移動する場合、いくつか問題が発生する。1つはFig.4.20左に示すように、ある姿勢で並進移動が可能な作業領域内であっても、マニピュレータの手先の位置を変えずに姿勢だけ回転させた場合、マニピュレータが特異姿勢になるケースが存在する。全ての姿勢に対して可操作度を十分に保つような領域を定めれば良いと考えられるが、その場合、最適作業領域が狭くなり、結果として頻繁に移動台車が動かなくなってしまう状況が予想される。そこで、最適作業領域を広く定めるためには、移動マニピュレータがよく用いられる基本姿勢を設定し、できるだけその姿勢を保つように移動台車とマニピュレータの位置関係を維持することが望ましい。もう1つはFig.4.20右に示すように、大型の対象物を運搬することを想定しているので、移動台車の位置する方向へ移動させたいときや対象物を回転させたい場合、移動台車そのものが運搬の妨げになることが考えられる。

これらの問題を解決するためには、移動台車を望ましい位置へ旋回移動させる必要がある。そこで、移動台車を旋回移動させるための手法として、マニピュレータ手先座標系に固定された仮想インピーダンス壁を利用した移動台車の旋回手法を提案する。この仮想壁は対象物の運搬妨害や特異姿勢を回避させるように決定する必要がある。把持する対象

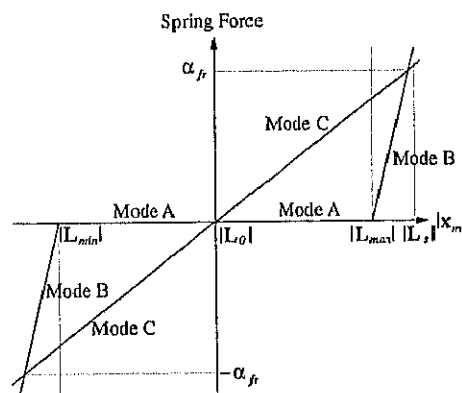


Figure 4.19: Nonlinear spring model.

物がマニピュレータの把持している場所から前方に位置するものと仮定すると、移動台車はマニピュレータの把持している場所より手先座標系の X_h 軸方向の正方向へ位置しなければ対象物の運搬の妨げになることはないと考えられる。マニピュレータの特異姿勢に関する問題も、人と移動マニピュレータが向い合った基本的な位置関係を維持することで解決できる。そこで一番簡単な仮想壁の設定例として、Fig.4.21 に示すように、マニピュレータ把持点より X_h 軸方向の正方向へ位置しないよう、手先座標系の Y_h 軸上に仮想的な壁を設定することを考える。

仮想壁はマニピュレータ手先座標系に固定されているのでマニピュレータの先端位置や姿勢に追従して動くことになる。マニピュレータの手先の姿勢が回転し、仮想壁が移動台車と接触したとき、移動台車は仮想壁からの反力により押されて回転運動するようにインピーダンス制御を行う。移動台車は、マニピュレータ先端の位置を中心に半径 R の円弧を描きながら回転運動をするように設計する。 R は仮想壁が移動台車と接触したときの、マニピュレータ先端位置から移動台車までの距離とする。手先座標系に固定される仮想インピーダンス壁は運搬する対象物やマニピュレータの可操作度、運搬物と移動台車の衝突回避を考慮して自由に位置や形状を設計することができる。

ここで、提案する手法の制御則について説明する。仮想壁からの反力を F_v としたとき、次式を満たすように移動台車をインピーダンス制御する。

$$\begin{cases} M_b \ddot{x}_b + D_b \dot{x}_b = F_v \\ K_v \Delta x_v = F_v \\ \dot{\theta}_b = \text{sign}(\theta_{bh}) |\dot{x}_b| / R \\ \dot{\theta}_h = \dot{\theta}_{bh} + \dot{\theta}_b \end{cases} \quad (4.17)$$

$$K_v = \begin{pmatrix} K_v & 0 \\ 0 & K_v \end{pmatrix}.$$

K_v は仮想壁の剛性係数とし、ある固定された値とする。 Δx_v は仮想壁に移動台車が接触後に仮想壁を押し込んだ距離とする。 θ_{bh} 、 $\dot{\theta}_{bh}$ はマニピュレータ先端の姿勢角と角速度、ベクトル \dot{x}_b 、 \ddot{x}_b は移動台車座標系におけるマニピュレータ先端と移動台車の回転中心を結ぶ直線に対し直角の方向へ発生する移動台車の速度と加速度を表す。ここで仮想壁からの反力を操作者に返すことを考えた場合、マニピュレータは把持物体に大きなトルクを与えなくてはならない。しかし、マニピュレータの先端にあるモーターの出力は、通常弱く大きな力を出すことができない。たとえ大きな力を加えられたとしても対象物に大きな内力を発生させることは破損に繋がることが考えられる。そこで、移動台車を旋回移動させるときは、仮想壁の反力を操作者に返さない制御にする。

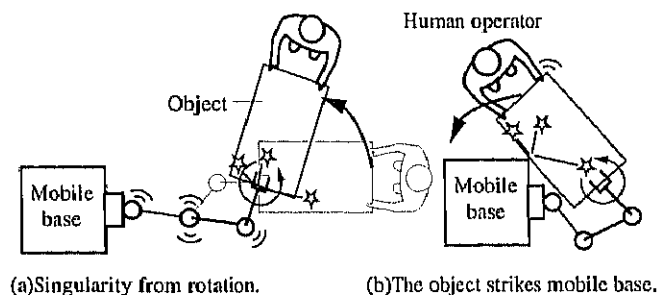


Figure 4.20: Rotation problems.

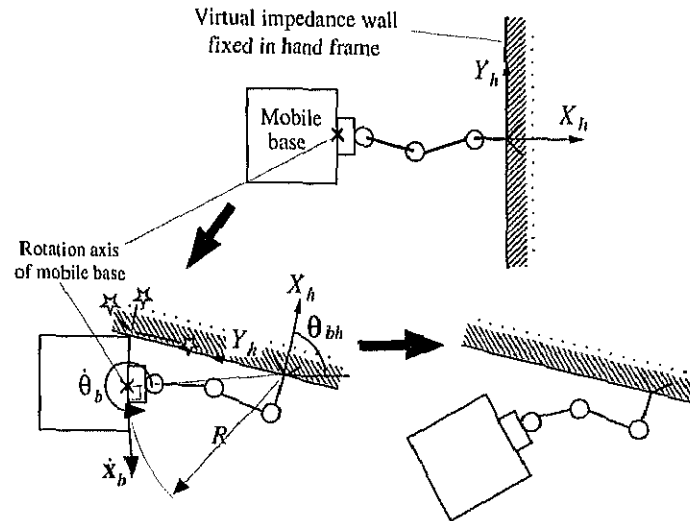


Figure 4.21: Rotation model.

以上の移動台車の並進・回転の制御則は、全方向移動台車を前提に話を進めてきたが、前節で述べた「非ホロノミック移動台車を備えた移動マニピュレータの制御」を用いることで一部の非ホロノミック移動台車にも本手法を用いることが可能である。

4.4.3 シミュレーション

提案手法を実際のロボットに導入する前に、シミュレータを構築し制御手法の有効性を確認する。構築するシミュレータは、実際の制御に用いるものと同様の関数を使用することで、実際に実験するときにかかるプログラムの欠陥を先に知ることができ、システム導入に対する安全性のためにも重要な事項である。シミュレータを構築する環境は、Linux上で3次元グラフィックをプログラミング可能なMesaというOpenGLに準拠したプログラムで構築するものとする。使用する言語はgccを使ったCプログラミングである。

実験装置のモデリング

実験で使用する移動マニピュレータは、前節で実験を行った移動マニピュレータと同様のモデルを用いる (Fig.4.6)。

ここで、システムの重心位置から移動マニピュレータの安定性について検討する。構成される移動マニピュレータの重量はそれぞれ、移動台車の重量150kg、マニピュレータの重量35kg、マニピュレータの可搬重量10kgとなる。マニピュレータを水平に横方向へ伸ばしたとき、マニピュレータ取り付け面から重心までの距離は490mmに位置する。また、このときの移動台車取り付け面からマニピュレータ先端までの距離は1345mm。移動台車の重心位置は台車の中心に位置するので、マニピュレータ取り付け面より350mm。また、使用する移動台車の車輪は旋回車軸からオフセットを有する機構であるので、旋回軸を中心に±30mmの範囲で接地点が変化する。最悪の場合を考えたとき、マニピュレータの取り付け面から車輪の接地面までの距離は140mmとなる。マニピュレータと移動台車の取り付け面を原点とした座標系を考え、マニピュレータ長手方向をプラス方向として重心

位置 x_g を求めると,

$$\begin{aligned} 150 \times (-350 + 140) + 35 \times (480 + 140) \\ + 10 \times (1345 + 140) &= (150 + 35 + 10) \times (x_g + 140), \\ x_g &= -114. \end{aligned} \quad (4.18)$$

したがって、マニピュレータを伸ばした状態では、重心位置が車輪の接地点で構成される支持面の外側に位置し、システムは転倒する危険性がある。ここで、 x_g が -140mm 以下であれば移動台車の支持面内に重心が位置することになるので、 $x_g = -140$ を代入し移動台車が運搬する対象物の位置を x_{obj} とし、マニピュレータの先端位置を簡単に計算する。

$$\begin{aligned} 150 \times (-350 + 140) + 35 \times (480 + 140) \\ + 10 \times (x_{obj} + 140) &= (150 + 35 + 10) \times (-140 + 140), \\ x_{obj} &= 1120. \end{aligned} \quad (4.19)$$

よって、運搬対象がマニピュレータ取り付け面から 1120mm 以内に位置することで、重心位置が移動台車の支持面内に位置することができる。実際にはマニピュレータ自身の重心位置が移動台車の方向へ移動することから 1120mm よりも若干遠くに位置しても支持面内に重心が位置する。しかし、最適作業領域を決定する時、ある程度余裕をもった境界の設定が望まれるため正確な限界を求める必要はないと考えた。

Fig.4.6 より移動マニピュレータの作業領域を考慮すると、(4.19) 式で求めた安定領域の限界はマニピュレータの作業領域より内側に位置しているので最適作業領域の最大値 $|L_{\max}|$ はマニピュレータ取り付け面から 1100mm を超えないように設定することを考える。また、作業領域の最小値 $|L_{\min}|$ はマニピュレータの関節角の可動範囲を考慮し、マニピュレータ取り付け面から 870mm とする。ここで、マニピュレータの作業領域はマニピュレータの第2関節の回転軸を中心とした領域で作業範囲が決まるため、移動台車座標系の原点を第2関節の回転軸におき、最適作業領域を移動台車の取り付け面からの第2関節軸までの距離を差し引いた値で $|L_{\max}| = 785\text{mm}$ 、 $|L_{\min}| = 485\text{mm}$ と決定する。

Fig.4.22 にマニピュレータの作業領域を示す。円周方向の作業領域にもマニピュレータの関節角により無理のない姿勢が望まれるので移動台車座標系 X_b 軸から ± 45 度の範囲で作業領域の範囲を区切り、扇形上の作業領域を考える。45度の境界上には仮想的なバネ・ダンパで構成された壁を考える。マニピュレータの先端位置がこの円周方向の作業領域の限界に到達したとき、マニピュレータは操作者に反力を返す。また、その反力に従ってインピーダンス制御をすることで移動台車の並進移動を行わせるものとする。高さ方向の作業領域はそのままの扇形の作業領域を維持し、マニピュレータ取り付け面の位置から上方へ 100mm 、下方へ 600mm の作業領域を定めた。マニピュレータの基本姿勢はマニピュレータの手先を下方へ向けた状態とし、手先に装着するエンドエフェクタで対象物を把持する。実際には、マニピュレータ先端からエンドエフェクタ把持部までの作業領域がさらに確保されることになる。マニピュレータ先端から電動グリッパの把持点までの距離は約 150mm である。

シミュレーション実験

シミュレータで構築した画面を Fig.4.23 に示す。3次元グラフィック環境には人と移動マニピュレータが対象物の両端を向い合って把持したグラフィックと、目標位置が描画し

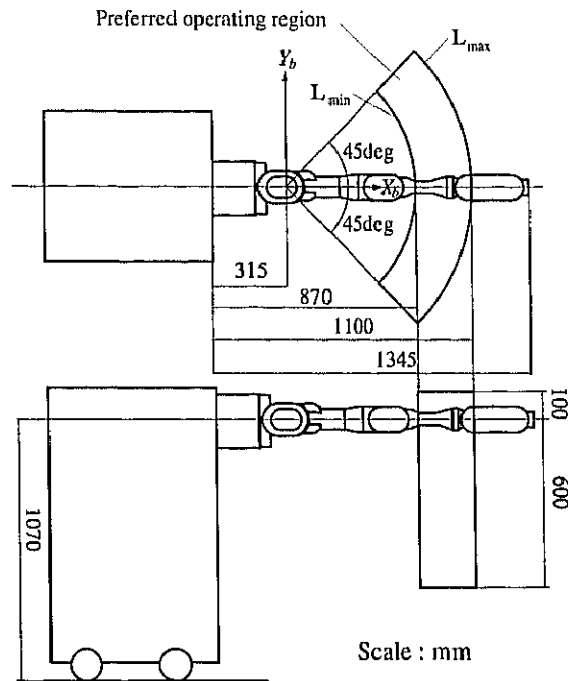


Figure 4.22: Workspace about manipulator.

Table 4.1: Impedance parameters.

M_{hx} [kg]	5.5	M_{hy} [kg]	100
D_{hx} [kg/s]	20	D_{hy} [kg/s]	5000
I_h [kg m ²]	5.5	C_h [kg m ² /s]	20
M_b [kg]	10	D_b [kg/s]	50
K_d [kg/m]	500	K_v [kg/m]	500

である。移動マニピュレータは、実機と同様に7自由度のマニピュレータと全方向移動台車を備えるものとする。前節で提案した移動台車を回転移動させるためのインピーダンス壁は、手先座標系 Y_h - Z_h 平面に設定する。シミュレーション実験ではロボットや対象物、操作者の把持位置を真上から見た画面で行うので、対象物の移動は水平面内の移動のみを考える。シミュレータ内のマニピュレータ手先位置は、力センサが取り付けられたジョイスティックの入力により操作できるように構築する。マニピュレータ先端の動きは2章で述べた仮想非ホロノミック拘束を与える手法を用いる。操作者はマニピュレータ把持点に与えられた非ホロノミック拘束を考慮し、目標位置まで対象物を移動させる。対象物の目標姿勢は初期姿勢から180度回転させた姿勢とする。シミュレータはジョイスティックの力情報からインピーダンス制御に用いるインピーダンスパラメータのシミュレーションも行うことができる。Table 4.1に各軸に使用するインピーダンスパラメータを示す。

シミュレーションでは、移動台車の回転移動が必要であるか確かめるため、移動台車が並進移動のみ行う制御手法と並進と回転の両方が行える手法を比較する。Fig.4.24に2つのシミュレーション実験の連続写真、Fig.4.25に2つのシミュレーション実験におけるマニピュレータの可操作度の変化と移動軌跡を示す。シミュレーション実験の連続写真より、並進移動のみの制御手法であると目的位置に対象物を回転させて位置させるとき、

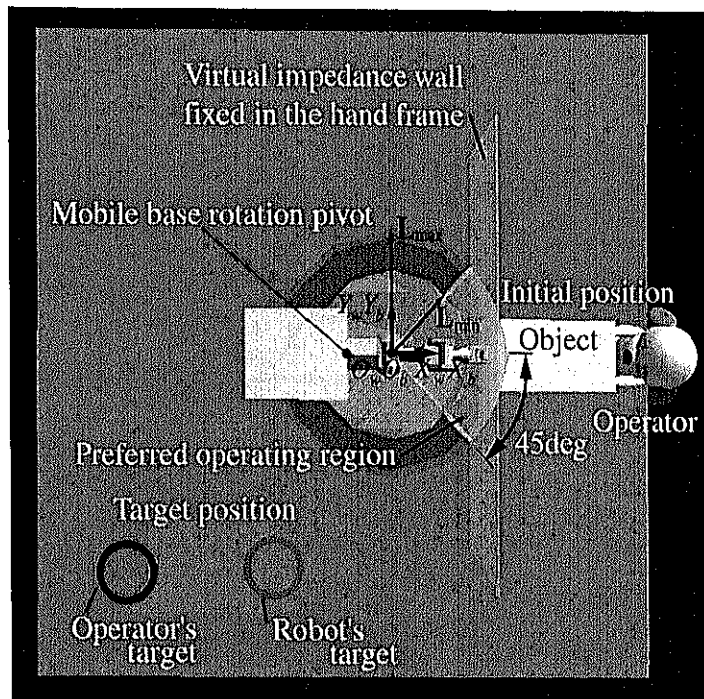
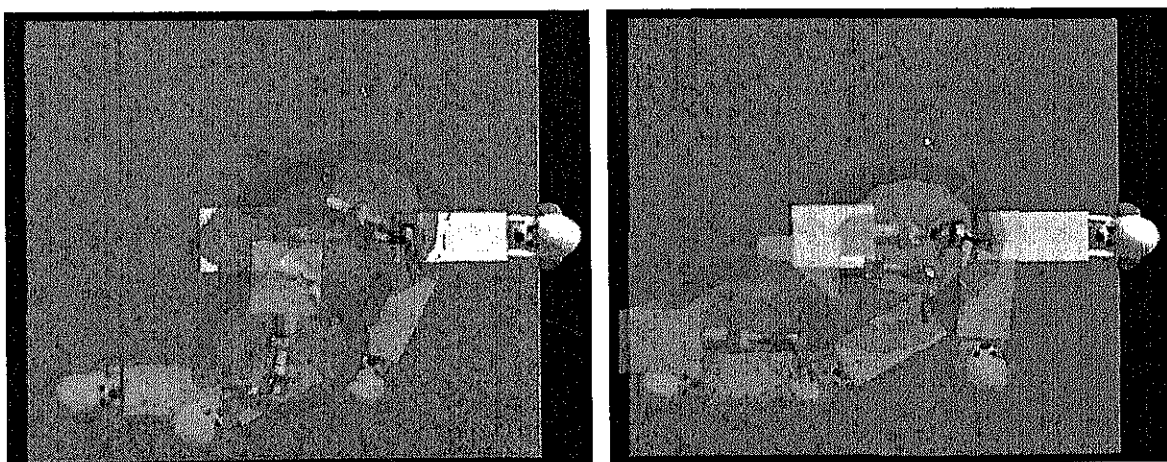


Figure 4.23: Setup of simulator.



(a) Rotate by virtual impedance wall. (b) Translational motion only.

Figure 4.24: Simulation results.

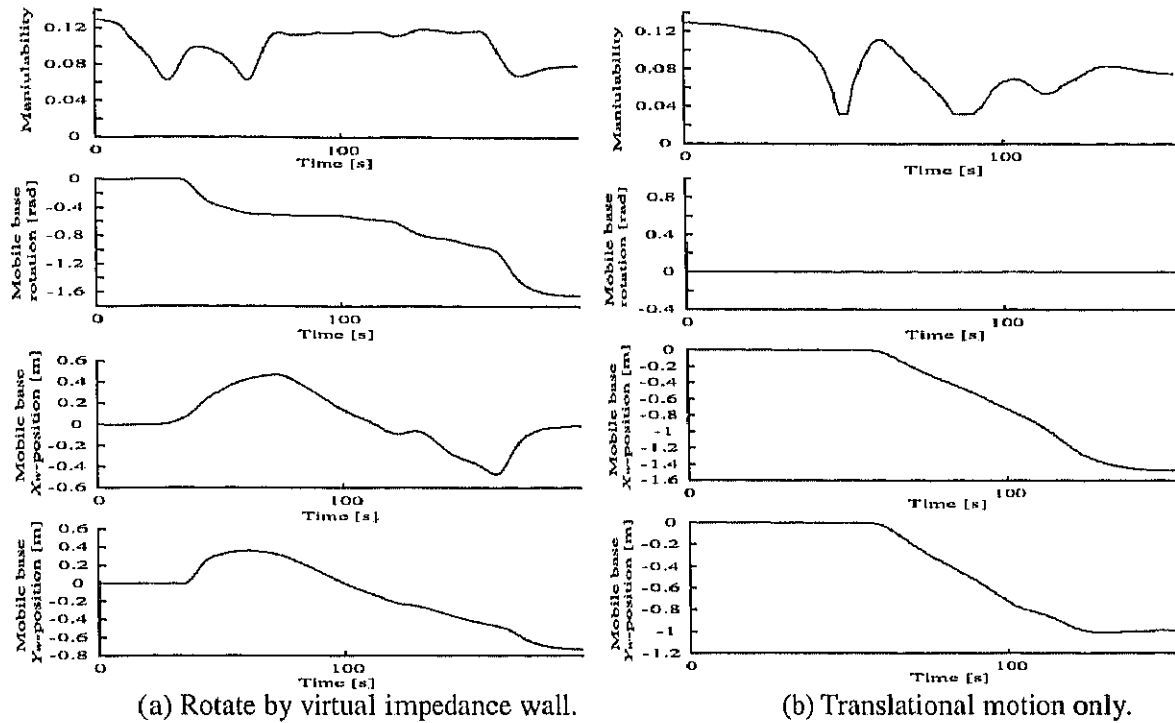


Figure 4.25: Trajectories of simulation.

対象物が移動台車に衝突してしまうことがわかる。また目的位置付近では、操作者も移動台車の近くに位置することになり非常に危険である。それに対し、手先座標系に固定されたインピーダンス壁を用いて移動台車を回転させる手法は、対象物の移動を移動台車が妨げることもなく目的位置まで到達することができる。可操作度の値を比べてみても並進移動のみの制御手法より、回転を含めた手法の方が大きく保たれている。

4.4.4 移動マニピュレータによる検証実験

シミュレーション実験により有効性を確認した仮想インピーダンス壁を利用した移動台車とマニピュレータの協調制御手法を使い、実際に人とロボットが協調して机の上へ対象物を運搬する実験を行い提案手法の有効性を確認したので、その状況を説明する。

実験に使う移動マニピュレータのシステムは、前節で用いたものと同様の構成とする。また、シミュレーション実験で構成した仮想空間は実物の移動マニピュレータの寸法を用いて構成しているので、移動マニピュレータからの関節角や位置情報を受け取り、シミュレータ上の仮想空間で実際のロボットの状態を再現させ操作者に提示することが可能となる。RTLinuxの制御周期を2msに設定し、制御に用いるインピーダンスパラメータはシミュレーション実験のときに用いたものと同様の値を使用する。

初期位置における移動台車座標系は絶対座標系の姿勢と平行かつ原点が $(x_w, y_w, z_w) = (0.00, 0.00, 1.07)$ [m,m,m] に位置するものとする。運搬する対象物はサイズ $410 \times 410 \times 1000$ mm, 重さ 4.5kg のダンボール箱とし、一端にグリッパが把持できるようにアルミニウム製角パイプが取り付けられている。この対象物を Fig.4.26 に示すように、床面に置いてある初期位置から目標位置である机の上へロボットと協調して持ち運ぶことを考える。

はじめに、操作者は全方向へ自由に移動できる等方的なインピーダンス制御を使った制

御モードで、マニピュレータのエンドエフェクタを対象物の把持点まで誘導し、掴ませる操作を行う。その後、移動マニピュレータと対象物の両端を向い合うように把持し、目標位置まで協調運搬を行う。計測は対象物を把持させるために、マニピュレータの初期位置から床面に置いてある対象物までエンドエフェクタを誘導している状態からはじめる。実験は20代の男性3人に行い、被験者には移動台車の挙動を十分説明してから計測を行った。そのうちの一人の結果を示す。

Fig.4.27 に初期位置から目標位置までの動きの連続写真を、Fig.4.28 に初期位置から目標位置までの移動台車、マニピュレータ先端、人の把持点の軌道を示す。また、Fig.4.29 にマニピュレータの可操作度の変化と移動台車の絶対座標系における位置・姿勢を示す。さらにFig.4.30 では、マニピュレータ手先座標系のZ軸方向に計測された力と移動台車座標系におけるマニピュレータ先端のZ-Y-Xオイラー角を示す。Fig.4.31 では、マニピュレータ手先座標系のX軸方向に計測された力と移動台車座標系におけるマニピュレータ先端の位置を示す。

計測開始から約24秒までの間は、マニピュレータに床面上の対象物を把持させるため、操作者はエンドエフェクタ部を把持し誘導している。このとき、マニピュレータの先端位置は最適作業領域内であるため移動台車は全く動かず、マニピュレータの動作のみで対象物までのアプローチを行っている。対象物の置いてある場所への移動は、最適作業領域の境界付近までマニピュレータが腕を伸ばす必要があるため、可操作度が大きく減少している。対象物を把持した瞬間に力の振幅が見られるが、これは、剛体を掴んだときにマニピュレータが振動するために計測される力である。24秒以降から、3次元空間内の仮想非ホロミック拘束を用いた制御に切り替え協調運搬を始める。

24秒より運搬を始めるとき、対象物を把持した姿勢角を基準値とするため、Z-Y-Xオイラー角の全ての値を0にリセットしてから運搬をはじめている。38秒付近で可操作度が最小値0.316をとるまでマニピュレータのみを使った協調運搬を行っている。38秒以降、移動台車がマニピュレータの可操作度の回復を図るように並進移動を開始している。移動台車が並進動作を始め、対象物の高さが上方へ移動するにつれて可操作度が大きく保たれている。移動台車の並進運動と回転運動により、シミュレーションと同様、操作者の運搬を妨げることなく目的位置までの運搬が行えている。38秒付近のX軸方向力センサの値を見ると、マニピュレータの作業領域の限界に近づき反力が大きくなったところで移動台車が移動を始め、並進や回転運動に伴い可操作度が回復していることが確認できる。

対象物の重量の補助は対象物のピッチ角(θ_Y)が水平に近いときに約15N(1.53kg)の力をロボット側が支えていることがわかる。前節の実験と同様、対象物の傾きが大きいほどロボット側のサポートする力が減少している。移動台車座標系の z_0 軸方向のマニピュレータ先端位置をみると、運搬開始位置から最終位置まで約700mm上方へ移動していることから、対象物の最終位置は机の上にあることが確認できる。対象物を最終的に机の上に置いたとき、Z軸方向の力がマイナス方向へ計測されているが、対象物を机へ置いたときの反力を力センサが計測しているためである。

運搬終了間近の73秒以降では、移動台車はほとんど移動せず、マニピュレータの動きで最終的な位置決めが行われている。移動台車による作業領域の補助を行わずとも、マニピュレータの移動だけで作業が遂行できる制御モードへ切り替わったためであり、移動台車の動作低減が実現されていることが確認される。

以上、提案するインピーダンス壁を用いた移動マニピュレータの協調制御手法を使い、対象物までのアプローチ、把持、そして、操作者とロボットが協調して非ホロミック拘

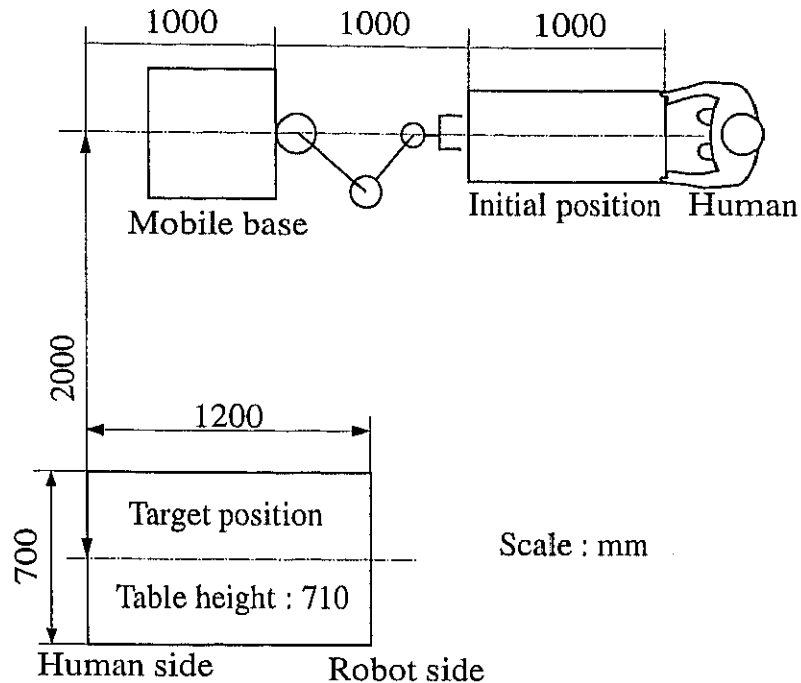


Figure 4.26: Target position and initial position.

束を用いた手法で3次元空間内の目標位置へ移動という一連の協調運搬作業が可能であることを確認した。

4.5 結言

本章では協調運搬システムを実際の環境に実用するための方法として、移動ロボットへ導入することを考え、提案する非ホロノミック拘束を用いた協調運搬手法が一般性をもった方法として人と協調運搬を行えることを実機との協調運搬実験により明らかにした。

まず、提案する仮想非ホロノミック拘束を用いる手法を、非ホロノミック移動台車と全方向移動台車へ導入する方法の検討を行った。非ホロノミック移動台車の場合、その場旋回のできるタイプの非ホロノミック移動台車であれば、移動台車の機能をそのまま用いて協調運搬が容易に行える。全方向移動台車を用いる場合は、移動台車座標系を設けることで、各軸に対し異方性を持ったインピーダンス制御を行い仮想的な非ホロノミック拘束を実現できることを述べた。

次に、移動マニピュレータを用いた協調運搬制御手法として、「移動台車主体の制御」と「マニピュレータ主体の制御」の2つのアプローチを検討した。まず、移動台車を主体とした制御手法は、移動台車が自由に動けるとき、移動台車の自由度を主体的に用いて水平面内の移動を行い、障害物付近に位置し移動台車の自由度が使えなくなると、マニピュレータがその作業領域を補助する手法である。水平面の移動をパワーのある移動台車を主体とした動きで補うため、マニピュレータは常に最適姿勢で作業できる。つまり、マニピュレータは対象物を支えることに専念することができることから、マニピュレータの可搬重量付近やそれを超える重量物の運搬に有効であると考えられる。一方、マニピュレータを主体とする制御手法は、マニピュレータの先端がある作業領域内にあるとき、移動

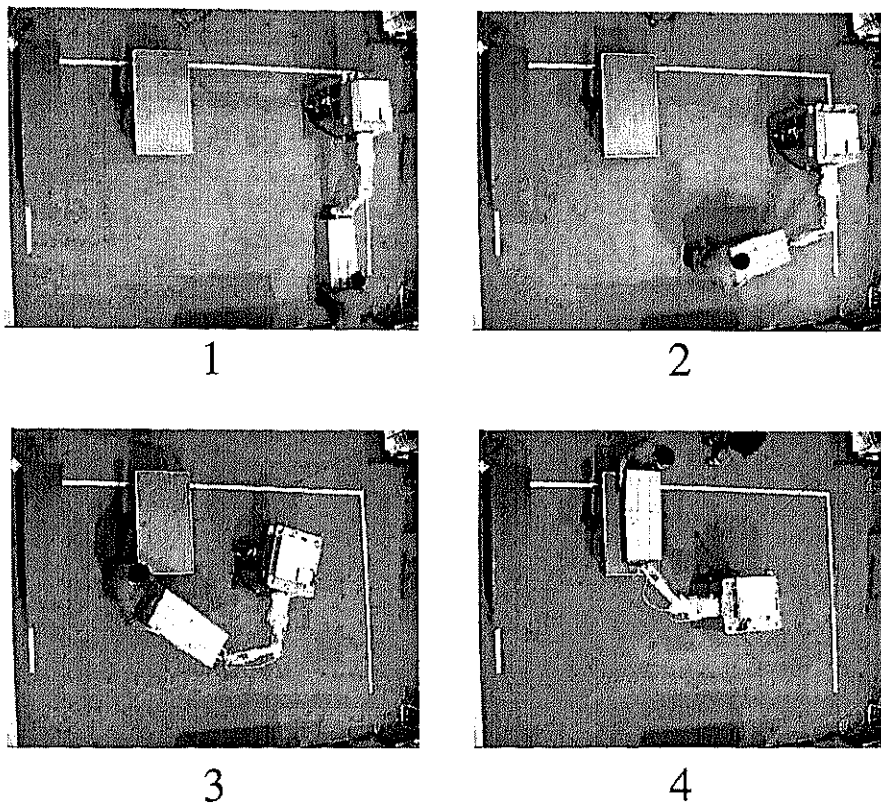


Figure 4.27: Transportation from the floor onto the desk (photos).

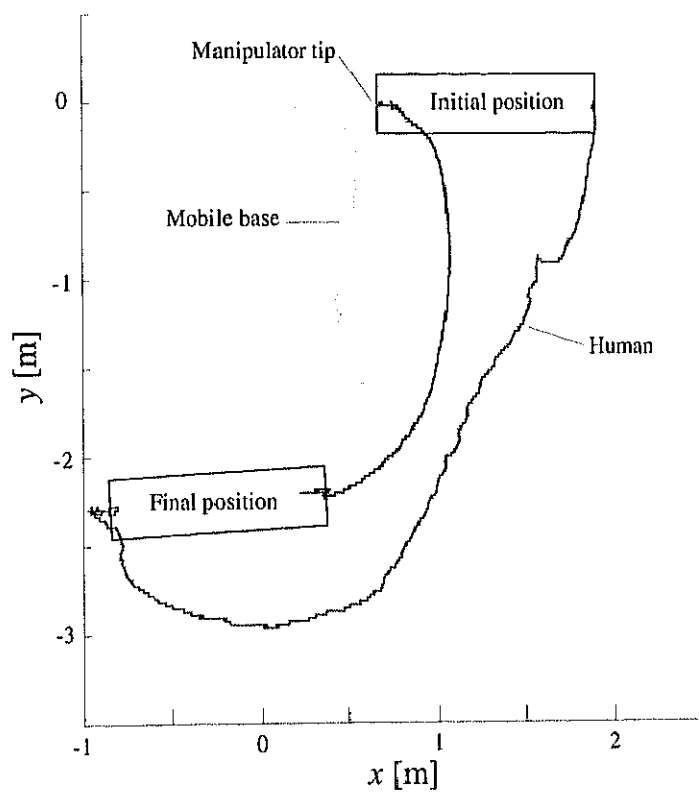


Figure 4.28: Experimental result (trajectories).

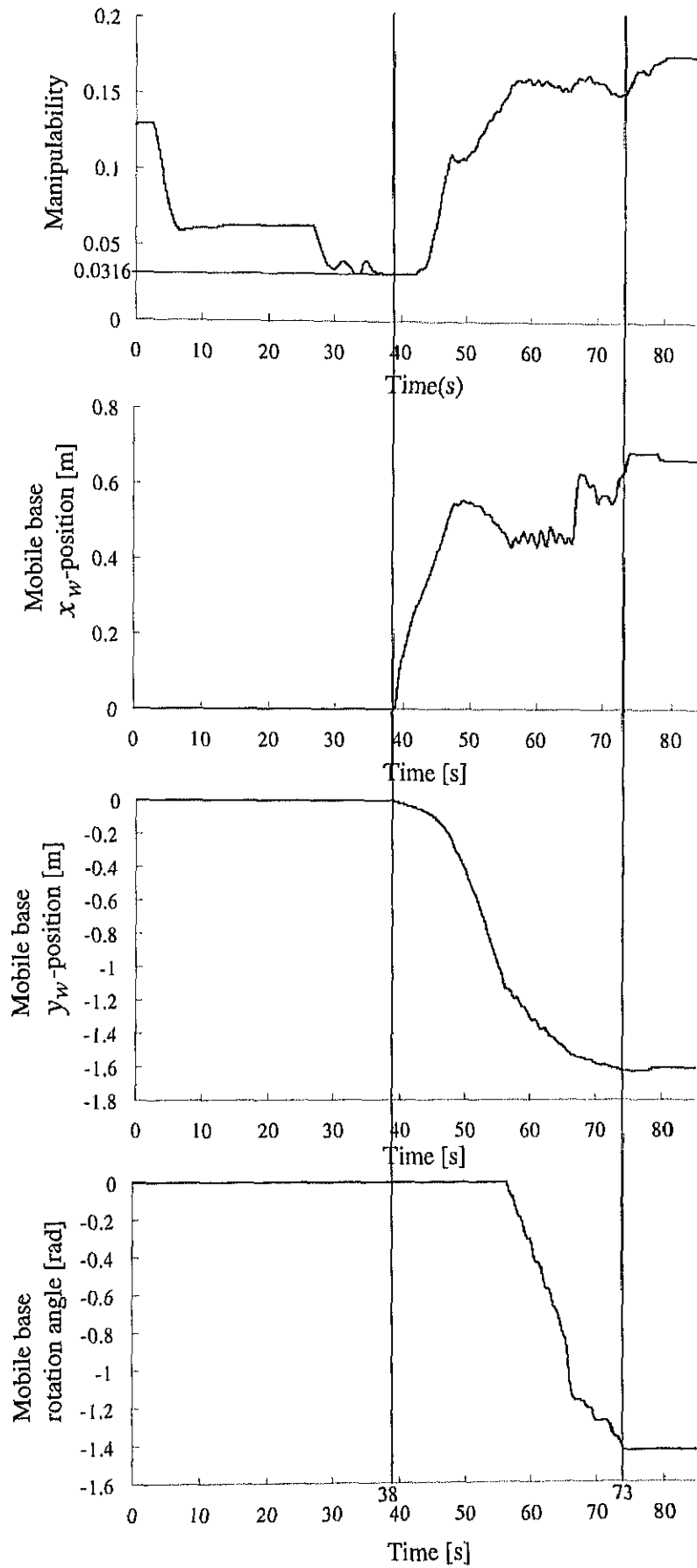


Figure 4.29: Manipulability and mobile base positions.

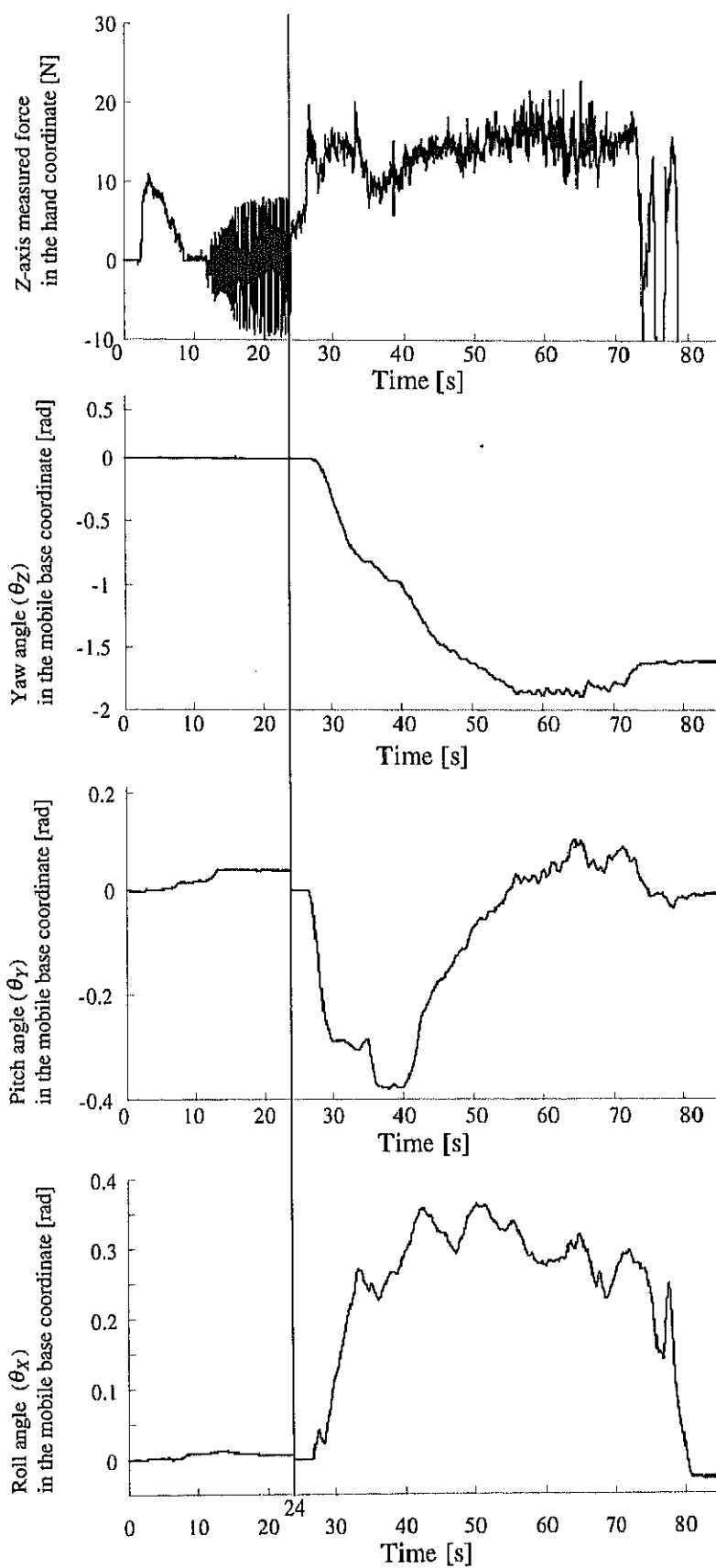


Figure 4.30: Support force and Euler angles.

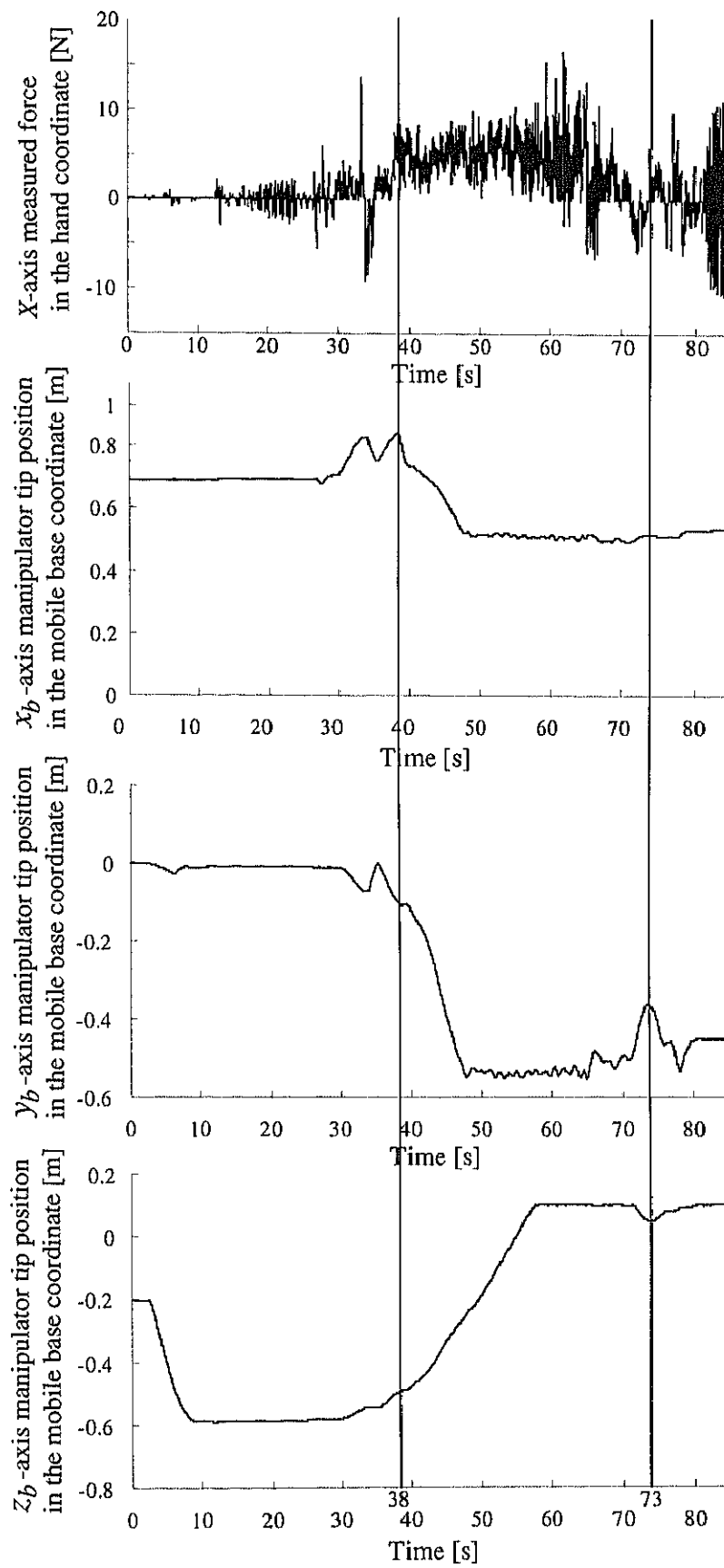


Figure 4.31: X-axis force and manipulator tip position in the mobile base coordinate.

台車を動かすことなく固定されたマニピュレータと同様の制御をする。これは、マニピュレータがある作業領域内を移動するときは移動台車を動かす必要なく作業領域とシステム全体の安定性を保つことができると考えたからである。移動台車を頻繁に動かす必要がないので、移動台車を動かすためのエネルギーの省力化や移動台車の動きによるシステム全体のレスポンス低下を防ぐことができる。さらに、頻繁にシステム全体を動かすことがなくなるので、移動マニピュレータとの協調作業で近くにいる人の安全性を考慮した制御手法となる。マニピュレータの可搬重量が制御に大きくかかわってくるため、移動台車主体の制御法とは逆に、比較的重量の少ないマニピュレータの可搬重量以内の対象物であるときに有効な手法である。

移動台車にマニピュレータを取り付けることで、マニピュレータのもつ3次元空間の作業範囲が拡張され、移動台車のみでは移動することのできない場所へアクセスすることが可能となった。本論文で提案する仮想非ホロノミック拘束を与える協調運搬制御を導入し、移動マニピュレータが対象物までアプローチ、対象物を把持、床面から部屋の隅、机の上などの目標位置へ持ち運ぶという一連の作業が行えることを実験により確認した。

本研究の結果、一般性を持った移動マニピュレータへ仮想非ホロノミック拘束を用いた人との協調運搬手法が容易に導入可能であり、第2章、第3章で確認された利点を得られることが示された。今後、様々な形態の移動マニピュレータが開発されたとしても、本提案手法は人との協調運搬手法として用いることが可能であることがいえる。