

非ホロノミック系操作のためのヒューマンインタフェース

荒井 裕彦*

Human Interface for Maneuvering Nonholonomic Systems

Hirohiko Arai*

Humans can easily maneuver some types of nonholonomic systems, e.g. wheeled vehicles, while other types, e.g. space robots, are difficult to handle intuitively. We propose a human interface to simplify the operation of "difficult" nonholonomic systems, which utilizes the human ability to maneuver "easy" systems. The difficult real system is converted into an easy virtual system using coordinate and input transformation. The input from the human operator to the virtual system is converted into input to the real system, while the state of the real system is converted into that of the virtual system which is displayed to the operator. The operator can then steer the real system feeling as if maneuvering the virtual system. Our experiments show that the operating performance is improved by this method.

Key Words: Nonholonomic System, Man-machine System, Human Interface, Chained Form

1. はじめに

近年、ロボット工学の分野で、非ホロノミック系の制御に関する研究が盛んに行われている [1] [2]。力学系の拘束条件のうち、時間 t と一般化座標 q のみを含む代数方程式 $g(q, t) = 0$ として表せないものを非ホロノミック拘束と呼ぶ。そのうちで、ロボット工学においてしばしば扱われるのは、拘束条件が速度を含む微分方程式で表され、それが積分不可能な系である。こうした非ホロノミック系の代表例としては、運動の方向が幾何学的に限定されるような運動学的拘束を受けるものと、角運動量保存による動力学の拘束を受けるものがある。前者には車輪型移動体 [3] [4] や非ホロノミックマニピュレータ [5] [6] などが含まれる。また後者には宇宙ロボット [7] [8] などが属する。

これらの例では、拘束条件は、

$$h(q)\dot{q} = 0 \quad (1)$$

という Pfaffian 拘束として表される。また、状態方程式は、

$$\dot{q} = G(q)u \quad (2)$$

という対称アフィン形式となる。

このタイプの非ホロノミック系の多くには以下のような特徴がある。

- (a) 一般に系の可制御性が成立し、系は任意の位置・姿勢に到達できる。
- (b) 制御入力 u の要素の数は一般化座標 q の要素よりも少なく、劣駆動系となる。
- (c) 式 (2) の 1 次線形近似系は不可制御である。
- (d) 系を平衡点に漸近安定化する時不変の状態フィードバック則は存在しない (Brockett の定理 [9])。

すなわち、(a) で制御できることは保証されているが、その制御には (b)~(d) のような困難を伴う。むしろ非ホロノミック系のこうした難しさが、実的な要請というよりも挑戦的な制御問題として研究者の関心を集める大きな理由になっているともいえる。そのため、これまで提案されている制御手法のほとんどは、運動計画についてもフィードバック制御についても、完全な一人手を介さない—自動化を目指したものだった。

さて、ロボットあるいは計算機にとっては、上に述べた通り非ホロノミック系の制御は難しい問題である。しかし、人間にとってそれがすべて困難かは議論の余地が残る。車輪は人類が発明したものの中で最古の部類に属し、長い歴史をもつ。自転車、自動車、手押し台車などの非ホロノミック車両の操作は多少の訓練を要するが、ほとんどの人間がそれらを道具として容易に使いこなせることは、我々の日常的な経験からも明らかである。一方で、宇宙ロボットなどの人間による操作は、通常の生活において接する機会が皆無である点から考えて、非常に困難な作業となることが予想される。このように、同じく式 (2) の形で表される非ホロノミック系であっても、人間にとって操作がやさしいものと難しいものの二通りが存在する可能性がある。

非ホロノミック系を含む人間機械系についてのロボット工学分

原稿受付 2002 年 5 月 20 日

*産業技術総合研究所知能システム研究部門

*Intelligent Systems Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

野における研究は少ない。Colgateらは、非ホロノミック拘束を有する機構を用いたハプティックディスプレイを考案した [10]。また同様の機構を人間とロボットの協調作業における運動ガイドとして利用することを提案している [11] [12]。一方、田中らは人間の上肢運動に非ホロノミック拘束を加えた際の挙動について解析を行った [13]。また筆者らは、人間とロボットの協調運搬作業において、ロボットに仮想的な非ホロノミック拘束を与えることによって人間の操作を容易にする方法を提案した [14] [15]。

人間による非ホロノミック系の操作を目的とした研究としては、佐伯らによる連結車両の制御に関する研究がある [16]。この研究では連結車両の後退時に車両後端が単体車両と同様の挙動を示すように制御系を設計することにより、操縦性の改善をはかっている。

本論文では、人間が非ホロノミック系を操作するためのヒューマンインタフェースを提案する。具体的には、人間にとって操作が難しいタイプの非ホロノミック系を、直観的に操作しやすいタイプの非ホロノミック系を扱う能力を利用して操作するための手法について述べる。この方法は、例えば宇宙ロボットの実時間遠隔操作や人手によるオフラインプログラミングにおいて有効と思われる。また、人間がループに含まれるため、その優れた適応能力により頑健なシステムが構築できる可能性がある。

本論文の構成は以下の通りである。第2章において、二つの代表的な非ホロノミック系のモデルを人間が操作する実験を行い、人間が容易に操作できる系と操作が難しい系があることを確かめる。第3章において、後者に属する系を直観的に操作可能にするヒューマンインタフェースを提案する。操作が困難な制御対象を、座標変換と入力変換により操作しやすい等価な仮想系に変換する。仮想系への操作者からの入力を制御対象への入力へ変換する一方、制御対象の座標を仮想系の座標に変換して操作者に提示する。第4章では、第2章で操作が困難だった系に提案した方法を適用して人間が操作する実験を行い、操作性が改善されることを示す。

2. 人間による非ホロノミック系の操作能力

本章では、単車輪および宇宙ロボットという二つの典型的な非ホロノミック系をシミュレータ上で人間が操作する実験を行う。それらの操作特性を比較することにより、系によって人間の操作の難易度が異なることを確認する。

まず、人間にとって操作しやすいと予想される非ホロノミック系として、単車輪をとりあげる (Fig. 1)。その状態方程式は、

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} \quad (3)$$

と表される。式 (3) では制御入力が車輪の進行速度 v および旋回速度 ω となっている。ここではマウスを主な入力装置とするため、これらをそのまま用いたのでは直観的な操作が難しい。そこで Fig. 1 のように車輪方向に長さ r の支持棒を取り付け、その先端のピボットに並進速度入力 (v_x, v_y) を与えることにより一輪の手押し台車のように車輪を操作する。この場合、

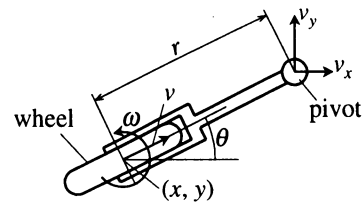


Fig. 1 Model of single wheel

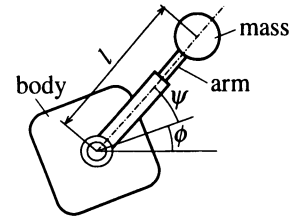


Fig. 2 Model of space robot

$$\begin{cases} v = v_x \cos \theta + v_y \sin \theta \\ \omega = (-v_x \sin \theta + v_y \cos \theta) / r \end{cases} \quad (4)$$

となる。 v_x, v_y はそれぞれマウスの左右方向、前後方向の速度に比例するように与える。

一方、人間による操作が難しいと思われる系として、宇宙ロボットを扱う。Fig. 2 の最も単純な平面モデルを考える。アームは回転と直動の2自由度である。アームの回転軸は本体の重心と一致する。アーム自体は無質量で、先端に M の質点をもつとする。本体の重心周り慣性モーメントを I 、アーム長を l とする。本体の絶対座標系における回転角を ϕ 、アームの本体に対する回転角を ψ とする。初期角運動量を零と仮定すると、この宇宙ロボットの状態方程式は、

$$\begin{pmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{l} \\ \dot{\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -\frac{Ml^2}{I+Ml^2} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta \\ \lambda \end{pmatrix} \quad (5)$$

となる。制御入力 η はアームの本体に対する相対角速度、 λ はアームの伸縮速度である。

この場合も、制御入力がこのままではマウスによる直観的操作が困難なため、アーム先端の運動とマウスの運動を一致させる。アームの運動による本体の並進は無視すると、本体重心を原点とする方向一定の座標系におけるアーム先端の位置は、

$$\begin{cases} x = l \cos(\phi + \psi) \\ y = l \sin(\phi + \psi) \end{cases} \quad (6)$$

と表される。アーム先端の x および y 方向速度は、

$$\begin{cases} v_x = \dot{l} \cos(\phi + \psi) - l(\dot{\phi} + \dot{\psi}) \sin(\phi + \psi) \\ v_y = \dot{l} \sin(\phi + \psi) + l(\dot{\phi} + \dot{\psi}) \cos(\phi + \psi) \end{cases} \quad (7)$$

ところで、式 (5) より、

$$\dot{\phi} + \dot{\psi} = \frac{I}{I + Ml^2} \eta, \quad \dot{l} = \lambda \quad (8)$$

であるから、

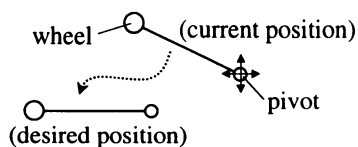


Fig. 3 Displayed image of wheel

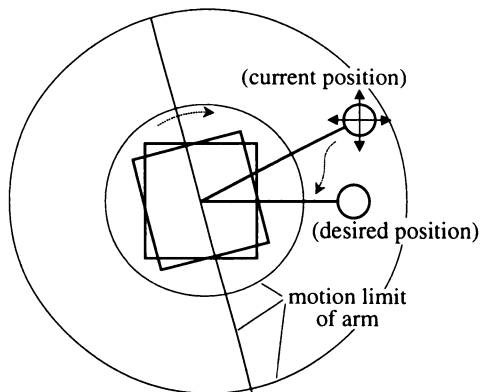


Fig. 4 Displayed image of space robot

$$\begin{cases} \eta = -\frac{I+Ml^2}{I} \{v_x \sin(\phi + \psi) - v_y \cos(\phi + \psi)\} \\ \lambda = v_x \cos(\phi + \psi) + v_y \sin(\phi + \psi) \end{cases} \quad (9)$$

v_x, v_y はやはりマウスの左右, 前後方向の速度に比例するように与える. 実験のための表示においても本体の並進は無視し, 本体重心を原点とする方向一定の座標系から見たロボットの姿勢を提示する. また, マウスの運動による入力と同座標系におけるアーム先端の運動として与える.

上に述べた単車輪系と宇宙ロボット系のそれぞれを人間が操作する実験をシミュレータ上で行う. 入力装置はマウス, 提示装置はCRTディスプレイを用いる. 提示および入力のサンプリング間隔は20 [ms]である. ディスプレイ上には制御対象の現在位置と目標位置が提示され, 被験者は制御対象を目標位置にできるだけ一致させるように指示される. 被験者は20代の男性4名である. 1回の実験は20秒間とし, 数回の練習の後でそれぞれ5回分の軌道データを記録する.

単車輪系の場合の提示像をFig. 3に示す. 操作者は手押し台車の支持棒先端ピボットに相当する小円をマウスで上下左右に動かすことにより, 車輪の位置および方向を操作する. 単車輪の初期位置は $(x_0, y_0, \theta_0) = (0.181, 0.930, \pi/4)$, 目標位置は $(x_d, y_d, \theta_d) = (0.529, 0, 0)$ とした.

また, 宇宙ロボット系の場合の提示像をFig. 4に示す. 操作者はアーム先端の質点に相当する円をマウスで上下左右に動かして, アームおよび本体姿勢を操作する. 宇宙ロボットの動力学パラメータは $M = 1, I = 2$ とした. また, アームの動作範囲の制限として $1 < l < 2, -\pi/2 < \psi < \pi/2$ を設け, それも提示した. 宇宙ロボットの初期位置は $(\phi_0, \psi_0, l_0) = (\pi/4, \pi/4, 1.5)$, 目標位置は $(\phi_d, \psi_d, l_d) = (0, 0, 1.5)$ とした.

軌道データは, 目標位置に対する二乗誤差の最小値 $\min(|\text{error}|^2)$, 操作中の二乗誤差平均値 $\frac{1}{T} \int_0^T |\text{error}|^2 dt$ および二乗誤差がある閾値より小さくなるまでの時間 T_e で評価し

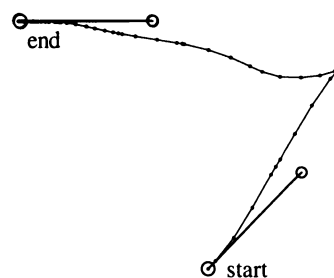


Fig. 5 Positioning of wheel

Table 1 Experimental results (wheel)

Subject	$\min(e_{xy\theta} ^2)$	$\frac{1}{T} \int_0^T e_{xy\theta} ^2 dt$	T_e (sec)
A	1.19×10^{-5}	0.207	5.64
B	2.21×10^{-5}	0.250	5.88
C	2.54×10^{-5}	0.206	4.24
D	3.03×10^{-5}	0.155	4.12

た. 単車輪については二乗誤差を $|e_{xy\theta}|^2 = w_x(x - x_d)^2 + w_y(y - y_d)^2 + w_\theta(\theta - \theta_d)^2$ とした. また宇宙ロボットについては $|e_{\phi\psi l}|^2 = w_\phi(\phi - \phi_d)^2 + w_\psi(\psi - \psi_d)^2 + w_l(l - l_d)^2$ とした. ここで, $w_x, w_y, w_\theta, w_\phi, w_\psi, w_l (> 0)$ は, 誤差を無次元化するための重み係数である. 本来, それぞれの重みの大きさは用途に依存する要求仕様から決定されるが, ここでは x, y, θ または ϕ, ψ, l の数値的なオーダーが互いに近接していることから, 便宜上 $w_x = w_y = w_\theta = w_\phi = w_\psi = w_l = 1$ とおいた.

単車輪系の位置決め操作の一例をFig. 5に示す. また各被験者の評価データをTable 1に示す. 数字は5回の実験の平均値である. 位置決め完了を判定する閾値は $|e_{xy\theta}|^2 < 0.001$ とした. 被験者A~Dともに6秒以内に位置決めを完了し, かなり高い精度で目標位置に到達している. いずれの被験者も, ほとんど練習をしなくてもすぐに操作が理解でき, 目標に近づけることが可能だった. また, モデルの挙動の性質を被験者に説明する必要もなかった.

それに対して宇宙ロボット系の場合は, いずれの被験者も最初はどうに操作すれば本体を回転させることができるかが分からなかった. アームを回転させると反動で本体が逆方向に回転する, アームが長いほど本体の回転が大きくなるという基本的な性質を口頭で説明し, さらに何回か練習した後では, アーム先端が円を描くように動かせば本体が回転することに気づき, 目標姿勢にかなり近づけることができる. しかし, その後も円運動の方向を間違えて本体姿勢を逆に回転させたり, 円の大きさと本体姿勢の回転角の関係が分からず調整ができないなどの困難が生じた. 宇宙ロボットの位置決め操作の一例をFig. 6に示す. また各被験者の評価データの平均値をTable 2に示す. 位置決め完了を判定する閾値は $|e_{\phi\psi l}|^2 < 0.001$ とした.

系の構造が異なるため数値データの単純な比較評価はできないが, 宇宙ロボット系が単車輪系と比べて明らかに操作しにくいことは確認できた. その理由としては次のような点が挙げられる. まず, 宇宙ロボットは日常生活で扱うことのない系であるため, 人間はそれを操作する技能を元々もっていない. 次に, 宇宙ロボットのアーム先端の運動と本体姿勢の回転との関係に

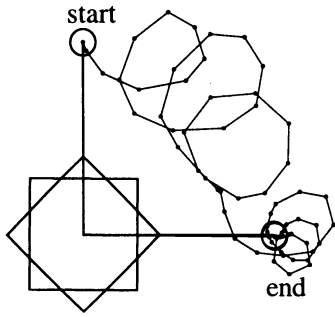


Fig. 6 Positioning of space robot

Table 2 Experimental results (space robot)

Subject	$\min(e_{\phi\psi l} ^2)$	$\frac{1}{T} \int_0^T e_{\phi\psi l} ^2 dt$	T_e (sec)
A	1.92×10^{-4}	0.219	8.58
B	1.04×10^{-4}	0.552	13.04
C	4.49×10^{-4}	0.720	15.14
D	2.26×10^{-4}	0.240	12.06

は動力学パラメータであるアーム先端の質量 M 、本体の慣性モーメント I が影響する。それらは視覚的に表現されていないため、提示像に基づいて操作の戦略を立てることができない。また、宇宙ロボット系の場合、アーム先端と本体姿勢の2箇所を同時に監視する必要がある、操作者の注意が分散する。

単車輪の場合は、車輪が拘束されている方向を視覚的に理解できるため、操作によって生ずる応答を予測しつつ操作の計画が行える。さらに、ピボットまたは車輪の近傍だけを注視していても位置と姿勢が分かるため、注視点の移動が少なくすむ。

一方で、宇宙ロボット系においても十分に練習を積めば、かなり自在な操作が可能となることが明らかとなった。どの被験者も、いくら練習しても最後まで宇宙ロボット系が扱えないということはなく、ある程度こつをつかめば目標位置の近くに到達できるようになる。このことは、人間がこうした非ホロノミック系を操作する技能を獲得する能力を本来もっていることを示すと思われる。

3. 系の変換によるインタフェース

前章では、式(2)の形式で表現される非ホロノミック系にも、人間にとって操作しやすいものと操作しにくいものがあることを確かめた。本章では、前者のタイプの非ホロノミック系を扱う際の人間の技能を利用して、後者のタイプの非ホロノミック系を操作するためのヒューマンインタフェースを提案する。

3.1 仮想系への変換

二つの異なる非ホロノミック系

$$\dot{q} = G(q)u \quad (q \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, n > m) \quad (10)$$

$$\dot{x} = H(x)v \quad (x \in \mathbb{R}^n, v \in \mathbb{R}^m, n > m) \quad (11)$$

を考える。状態 q, x の要素の数、入力 u, v の要素の数はそれぞれ等しいとする。式(10)の系と式(11)の系が、座標変換

$$x = \alpha(q) \quad (12)$$

および入力変換

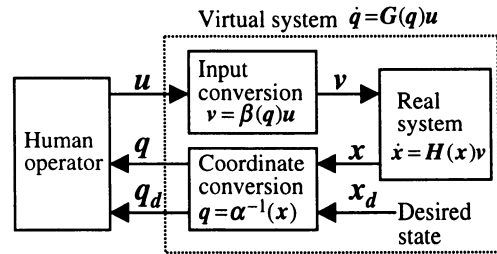


Fig. 7 Human interface via system transformation

$$v = \beta(q)u \quad (13)$$

により、相互に変換できるとする。ただし $\frac{\partial \alpha}{\partial q}, \beta$ はそれぞれ正則行列とする。そのための条件を考える。式(12)、(13)を式(11)に代入して、

$$\frac{\partial \alpha}{\partial q} \dot{q} = H(\alpha(q))\beta(q)u \quad (14)$$

上式と式(10)より、

$$\frac{\partial \alpha}{\partial q} G(q) = H(\alpha(q))\beta(q) \quad (15)$$

この式を成り立たせる $\alpha(q), \beta(q)$ が存在すれば、式(11)の系は式(10)の系と等価であり、互いに変換可能である。

さて、式(10)の系は人間にとって操作が容易で、式(11)の系は操作が困難とする。このとき、系(11)を人間による実際の操作対象として、これを目標状態 x_d に到達させる問題を考える。式(12)の逆変換

$$q = \alpha^{-1}(x) \quad (16)$$

によって系(11)の現在の状態 x および目標状態 x_d をそれぞれ仮想的な系(10)の現在の状態 q および目標状態 q_d に変換し、操作者に提示する。また、系(11)における障害物や動作制限などの不等式拘束条件も、同様に式(16)によって系(10)の状態への拘束条件に変換する。一方、提示された状態に基づく操作者から系(10)への入力 u を、式(13)によって系(11)への入力 v に変換する(Fig. 7)。そうすると、操作者からはあたかも仮想系(10)を操作しているような感覚で、実際には系(11)を操作することができる。仮想系(10)が目標状態 q_d に到達すれば、操作対象である系(11)も目標状態 x_d に到達する。

ただし、状態方程式の構造の変換だけでなく、操作者への仮想系の提示および操作入力の設定が人間にとって理解しやすい表現となるように注意しなくてはならない。例えば、前章の例における単車輪でも、状態量が車輪の位置・姿勢ではなく x, y, θ のグラフとして提示されたとすれば、直観的な操作は極めて困難になると予想される。また、マウスの入力とピボットの運動の対応において x 方向と y 方向が互いに入れ替わっていたら、やはり操作は非常に難しいであろう。このように、観測量の設定や制御量の設定も人間にとっての操作の難易度に大きく影響する。

この手法は、発想としてはロボットマニピュレータの作業座標系制御と似ている。マニピュレータの各関節の角度を人間が

操作して先端を目標位置にもっていくことは難しい作業である。しかし、作業座標系での位置指令を関節座標系への指令に変換し、一方で関節座標系での形状から変換された作業座標系でのマニピュレータ先端位置を監視すれば、人間は直観的な操作が可能となる。

3.2 正準系を介した変換

さて、一般の系に対して式 (15) から変換のための $\alpha(q)$, $\beta(q)$ を見出すのはかなり難しい問題である。そこで、一つの手法として、非ホロノミック系の正準系としてしばしば用いられる Chained Form を介した変換を考える。二つの 2 入力非ホロノミック系

$$\dot{q} = g_1(q)u_1 + g_2(q)u_2 \quad (q \in \mathbb{R}^n, u_1, u_2 \in \mathbb{R}) \quad (17)$$

$$\dot{x} = h_1(x)v_1 + h_2(x)v_2 \quad (x \in \mathbb{R}^n, v_1, v_2 \in \mathbb{R}) \quad (18)$$

がそれぞれ座標変換および入力変換

$$\xi = \alpha_1(q), \quad \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = \beta_1(q) \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$\xi = \alpha_2(x), \quad \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = \beta_2(x) \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} \quad (20)$$

によって同一の Chained Form

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \nu_1 \\ \dot{\xi}_2 = \nu_2 \\ \dot{\xi}_3 = \xi_2 \nu_1 \\ \vdots \\ \dot{\xi}_n = \xi_{n-1} \nu_1 \end{cases} \quad (21)$$

に変換されるとする。ただし、 $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_n)^T$ である。

式 (19), (20) より、

$$\alpha_1(q) = \alpha_2(x) \quad (22)$$

$$\beta_1(q) \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \beta_2(x) \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} \quad (23)$$

であるから、

$$x = \alpha_2^{-1}(\alpha_1(q)) \quad (24)$$

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \beta_2(x)^{-1} \beta_1(q) \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (25)$$

となり、式 (12), (13) に相当する座標変換、入力変換を求めることができる。

Murray と Sastry は、式 (17) で表される非ホロノミック系を式 (21) の Chained Form に変換する式 (19) のような座標変換、入力変換が存在するための十分条件を示している [3]。また、単車輪、二輪移動体、四輪移動体 [3]、トレーラ [4]、非ホロノミックマニピュレータ [5] [6]、ある種の宇宙ロボット [7] [8] など、多くの非ホロノミック系が Chained Form に変換できることが知られており、本節の手法でこれらの非ホロノミック系の間の変換が可能である。

4. 人間による操作実験

本章では、第 2 章で例として挙げた二つの非ホロノミック系に対して第 3 章の手法を適用し、人間による操作のためのインタフェースを構築する。第 2 章の実験では操作が困難だった宇宙ロボット系を操作対象とする。Chained Form を介して操作しやすい仮想的な単車輪系との間で変換を行い、これを人間に対する提示および操作のインタフェースとする。本手法により宇宙ロボットのモデルを操作する実験を行い、第 2 章における直接の操作よりも操作特性が改善されることを確かめる。

4.1 宇宙ロボット系/単車輪系の変換

式 (3) の単車輪系において、座標変換を

$$\begin{cases} \xi_1 = \theta \\ \xi_2 = x \cos \theta + y \sin \theta \\ \xi_3 = x \sin \theta - y \sin \theta \end{cases} \quad (26)$$

とする。また、入力変換を

$$\begin{cases} \nu_1 = \omega \\ \nu_2 = v - \xi_3 \omega \end{cases} \quad (27)$$

とする。式 (26) の両辺を時間微分し、式 (3), (27) を代入すると、

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \nu_1 \\ \dot{\xi}_2 = \nu_2 \\ \dot{\xi}_3 = \xi_2 \nu_1 \end{cases} \quad (28)$$

という 3 状態 2 入力の Chained Form が得られる。

一方、式 (5) の宇宙ロボット系においては、座標変換を

$$\begin{cases} \xi_1 = \psi \\ \xi_2 = -\frac{Ml^2}{I+Ml^2} \\ \xi_3 = \phi \end{cases} \quad (29)$$

とおき、入力変換を

$$\begin{cases} \nu_1 = \eta \\ \nu_2 = -\frac{2Ml}{(I+Ml^2)^2} \lambda \end{cases} \quad (30)$$

とすれば、やはり同様に式 (28) の Chained Form が得られる。

式 (26) より、

$$\begin{cases} x = \xi_2 \cos \xi_1 + \xi_3 \sin \xi_1 \\ y = \xi_2 \sin \xi_1 - \xi_3 \cos \xi_1 \\ \theta = \xi_1 \end{cases} \quad (31)$$

式 (29), (31) より、宇宙ロボットの現在位置 (ϕ, ψ, l) および目標位置 (ϕ_d, ψ_d, l_d) をそれぞれ単車輪の現在位置 (x, y, θ) 、目標位置 (x_d, y_d, θ_d) に変換し、操作者に提示する。また、アームの動作制限 $\psi_{min} < \psi < \psi_{max}$, $l_{min} < l < l_{max}$ も

$$\begin{cases} \psi_{min} < \theta < \psi_{max} \\ -\frac{Ml_{max}^2}{I+Ml_{max}^2} < x \cos \theta + y \sin \theta < -\frac{Ml_{min}^2}{I+Ml_{min}^2} \end{cases} \quad (32)$$

と変換し、提示する。

また、式 (30) より、

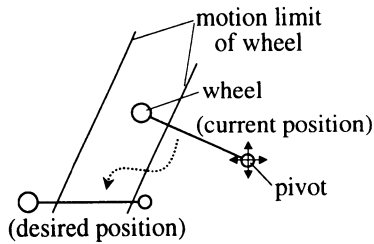


Fig. 8 Displayed image of proposed interface

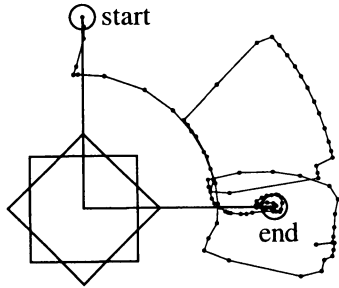


Fig. 9 Positioning with proposed interface

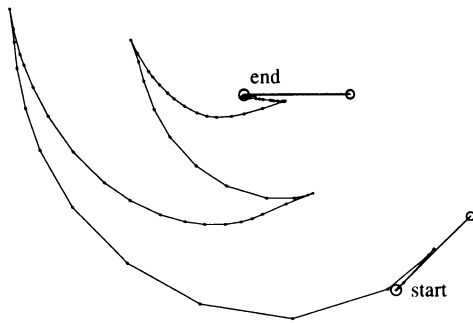


Fig. 10 Trajectory of virtual system

$$\begin{cases} \eta = \nu_1 \\ \lambda = -\frac{(I+Ml^2)^2}{2MII} \nu_2 \end{cases} \quad (33)$$

式 (27), (33) より単車輪への制御入力 (v, ω) を宇宙ロボットへの入力 (η, λ) に変換する。

以上のような系の変換により, 操作者はあたかも単車輪系を操作しているような感覚で宇宙ロボット系を操作できる。ここでは制御対象を宇宙ロボット系としたが, 同じ方法で3状態2入力の Chained Form に変換可能な任意の非ホロノミック系を制御対象とすることができる。

4.2 実験結果

操作者への提示像を Fig. 8 に示す。単車輪および支持棒に加えて, 宇宙ロボットのアームの動作制限を変換した動作範囲が提示されている。マウスの前後左右の速度に比例する並進速度入力をピボットに与える。第2章の実験と同じ4名の被験者について20秒間ずつ各5回のデータを記録した。初期位置, 目標位置は第2章と等しくそれぞれ $(\phi_0, \psi_0, l_0) = (\pi/4, \pi/4, 1.5)$, $(\phi_d, \psi_d, l_d) = (0, 0, 1.5)$ である。位置決め操作の一例を Fig. 9 に示す。また, この際に仮想系として提示した単車輪の操作軌跡を Fig. 10 に示す。

Table 3 Experimental results (proposed interface)

Subject	$\min(e_{\phi\psi l} ^2)$	$\frac{1}{T} \int_0^T e_{\phi\psi l} ^2 dt$	T_e (sec)
A	6.98×10^{-5}	0.395	10.44
B	5.17×10^{-5}	0.464	11.00
C	1.15×10^{-4}	0.309	9.50
D	7.42×10^{-5}	0.423	6.54

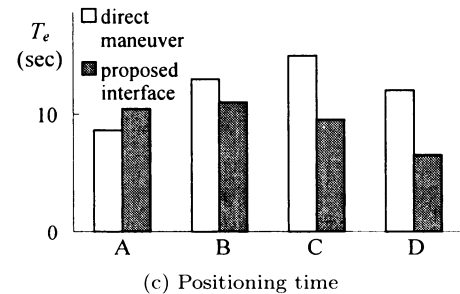
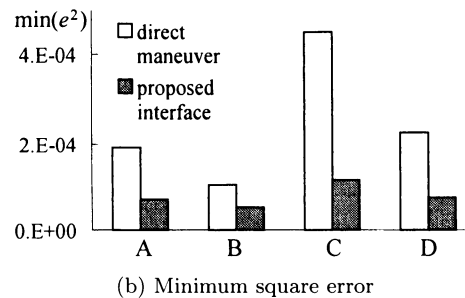
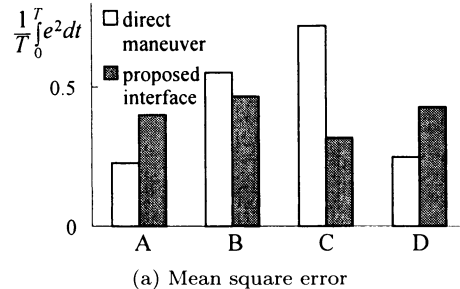


Fig. 11 Proposed interface vs. direct maneuver

最小二乗誤差 $\min(|e_{\phi\psi l}|^2)$, 平均二乗誤差 $\frac{1}{T} \int_0^T |e_{\phi\psi l}|^2 dt$ および $|e_{\phi\psi l}|^2 < 0.001$ となるまでの到達時間 T_e を評価した。ここでの二乗誤差は宇宙ロボットの状態量 ϕ, ψ, l について求めている。Table 3 に各被験者の評価データを示す。また, 第2章におけるアーム先端の直接操作による宇宙ロボット系操作の結果と本手法による結果を同じグラフにプロットしたものを Fig. 11 に示す。

提案したインタフェースを用いれば, 操作者からの見かけ上は単車輪系と同じ操作になるため, 目標位置に近づけるための操作方法がすぐに理解できる。また, 目標位置近傍での微調整も容易である。Fig. 11 の比較からも, やや個人差はあるものの, 位置決め精度および早さが改善されていることが分かる。

提案したインタフェースにおいて, 被験者からやや操作しにくいと指摘された点は, アームの動作範囲による車輪の動作制限である。車輪の姿勢によって, 車輪が動きうる範囲を示す壁も動くことが, 操作を難しくする場合がある。このことが, 直

Table 4 Experimental results (equivalent wheel)

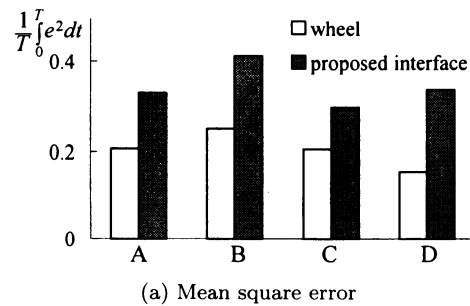
Subject	$\min(e_{xy\theta} ^2)$	$\frac{1}{T} \int_0^T e_{xy\theta} ^2 dt$	T_e (sec)
A	1.95×10^{-5}	0.329	10.22
B	2.05×10^{-5}	0.412	10.32
C	3.02×10^{-5}	0.296	7.88
D	2.60×10^{-5}	0.335	6.44

接操作と比べてそれほど制御成績が向上しないケースの原因となっており、動作制限をどのように提示するかについては改良の余地がある。本実験では動作制限を車輪の側で示したが、ピボットの側に示すことで多少操作しやすくなるようである。また、車輪からピボットまでの距離 r は任意に設定できるので、動作制限の幅に応じて操作しやすい長さに調整することも可能であろう。動作制限の影響は初期位置と目標位置が遠く離れている場合に特に顕著であるから、中間の目標位置を提示して段階的に最終目標位置に誘導することも有効と思われる。

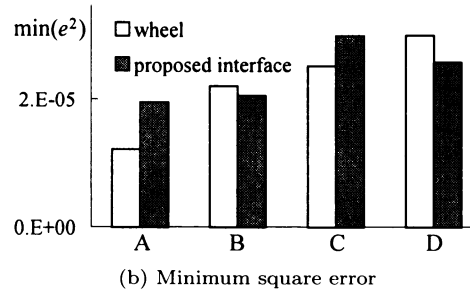
また、上の実験で提示される仮想的な単車輪の初期位置および目標位置はそれぞれ $(x_0, y_0, \theta_0) = (0.181, 0.930, \pi/4)$, $(x_d, y_d, \theta_d) = (0.529, 0, 0)$ で、実は第2章における単車輪系の操作実験と同じ条件になっている。単車輪に換算された最小二乗誤差 $\min(|e_{xy\theta}|^2)$ 、平均二乗誤差 $\frac{1}{T} \int_0^T |e_{xy\theta}|^2 dt$ および $|e_{xy\theta}|^2 < 0.001$ となるまでの到達時間 T_e を **Table 4** に示す。また **Table 4** と第2章の単車輪の実験結果 **Table 1** のデータを同じグラフにプロットしたものを **Fig. 12** に示す。宇宙ロボットを変換した単車輪の場合、動作制限のため到達時間および平均誤差ではやや劣るものの、最終的な位置決め精度は動作制限の影響を受けていないことが分かる。

最後に、提案したインタフェースおよびアーム先端の直接操作による宇宙ロボット系の操作に、未経験の操作者が習熟する様子を調べた。これまでの実験とは別の被験者2名（20代、30代の男性各1名）について、位置決め時間の変化を記録した。初期位置を $(\phi_0, \psi_0, l_0) = (0.2, 0.2, 1.5)$, $(0, -0.2, 1.5)$, $(-0.2, 0, 1.5)$, $(-0.2, -0.2, 1.5)$, $(0.2, 0, 1.5)$ の5点とし、それぞれ同じ目標位置 $(\phi_d, \psi_d, l_d) = (0, 0, 1.5)$ への位置決め操作を行って、その時間の合計を1回分のデータとする。アーム先端の位置誤差を e_{xa} , e_{ya} 、本体の姿勢誤差を e_ψ として、 $|e_{xa}| < 0.01$, $|e_{ya}| < 0.01$, $|e_\psi| < 0.01$ となったときに位置決め完了と判定する。比較的狭い範囲の操作で精度の高い位置決めを行うため、この実験では入力装置としてトラックボールを用いる。実験の前に、習熟した操作者（筆者）による模範操作を1回分見せるのみで、系の挙動の口頭による説明は行わない。

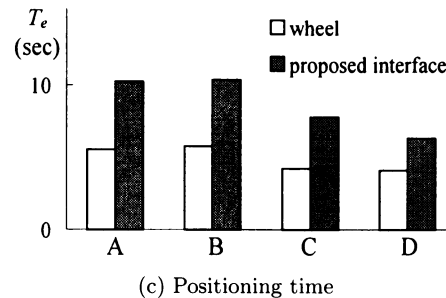
各被験者について、まったく未経験の状態から8回分の位置決め時間をプロットしたものが **Fig. 13** である。被験者 E (**Fig. 13(a)**) では、いずれのインタフェースを用いた場合も回数を重ねるに従って位置決め時間が短縮され、8回目には最初の約1/3の時間で目標位置に到達できるようになる。また、提案したインタフェースの方が短い時間で位置決めが可能である。被験者 F (**Fig. 13(b)**) の場合、提案した方法では到達時



(a) Mean square error



(b) Minimum square error



(c) Positioning time

Fig. 12 Proposed interface vs. wheel

間が多少短縮されていくが、全体にあまり顕著な改善の傾向は見られない。これは模範操作の観察と1回目の操作だけですでに操作の要領をつかんだためと思われる。この場合も、到達時間の平均は提案したインタフェースを用いた方が短い（なお、<http://staff.aist.go.jp/h.arai/hi.nhl.html> において、本論文の実験に用いたプログラムをもとにしたJavaシミュレータにより操作感覚が実際に体験できる）。

5. ま と め

本論文では、宇宙ロボットなどの人間にとって操作しにくい非ホロノミック系を、単車輪などの操作しやすい非ホロノミック系に変換し、それを提示および入力インタフェースとして用いる方法を提案し、その有効性を確認した。今後の課題としては次のような点が挙げられる。

まず本論文では、人間による操作が容易な非ホロノミック系として経験的に単車輪を選んだ。より多くの状態、入力をもつ場合を含めて一般の非ホロノミック系の操作の難易度を表す基準を検討し、人間にとって操作しやすい非ホロノミック系とはどのようなものかを見出すことが必要である[†]。

また、操作対象である非ホロノミック系とインタフェースのための仮想系との間の変換はChained Formを介して行っている。より広いクラスの非ホロノミック系を対象とするためには、

[†]筆者らの別の研究[15]から、3入力5変数をもつ別のタイプの非ホロノミック系（一端に非ホロノミック拘束をもつ棒の三次元空間内の操作）も、人間にとって操作が容易であることが分かっており、これもインタフェースとして利用できる可能性がある。

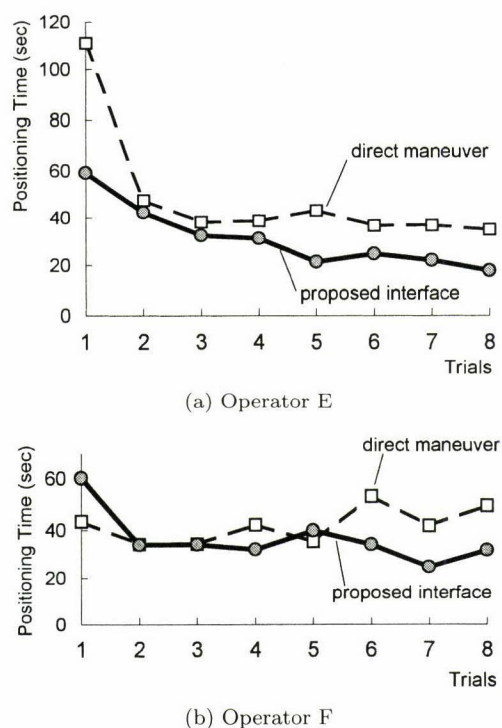


Fig. 13 Improvement of performance by practice

Chained Formを用いない非ホロノミック系間の変換あるいは近似変換の手法が必要である。

参考文献

- [1] 中村ほか: “ミニ特集 非ホロノミック系の制御”, 計測と制御, vol.36, no.6, pp.384-416, 1997.
- [2] I. Kolmanovsky and N.H. McClamroch: “Developments in Nonholonomic Control Problems,” IEEE Control Systems, vol.15, no.6, pp.20-36, 1995.
- [3] R.M. Murray and S.S. Sastry: “Nonholonomic Motion Planning: Steering Using Sinusoids,” IEEE Trans. Automatic Control, vol.38, no.5, pp.700-716, 1993.
- [4] O. J. Sordalen: “Conversion of the Kinematics of a Car with n Trailers into a Chained Form,” Proc. of 1993 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.1, pp.382-387, 1993.
- [5] 中村, O.J. Sordalen, W.J. Chung: “非ホロノミック・マニピュレー

- タの理論的設計と非線形制御”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.5, pp.674-682, 1995.
- [6] 羅, 船木: “直交座標型非ホロノミックロボットの設計と制御”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.7, pp.1038-1043, 1995.
- [7] M. Sampei, H. Kiyota and M. Ishikawa: “Time-state Control Form and Its Application to a Non-holonomic Space Robot,” Proc. of IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems Design 1995, pp.679-684, 1995.
- [8] 松野, 齋藤, 鶴崎: “あるクラスの3状態2入力非ホロノミックシステムの制御系設計と小惑星サンプルリターンロボットの姿勢制御”, 計測自動制御学会論文集, vol.37, no.6, pp.549-556, 2001.
- [9] R.W. Brockett: “Asymptotic Stability and Feedback Stabilization,” in Differential Geometric Control Theory. R. W. Brockett, R. S. Millman, and H. J. Sussmann, eds., pp.181-191, Birkhäuser, Boston, 1983.
- [10] J.E. Colgate, M. Peshkin and W. Wannasupphoprasit: “Non-holonomic Haptic Display,” Proc. of 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.539-544, 1996.
- [11] W. Wannasupphoprasit, R. Gillespie, J.E. Colgate and M. Peshkin: “Cobot control,” Proc. of 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3571-3576, 1997.
- [12] K.M. Lynch and C. Liu: “Designing Motion Guides for Ergonomic Collaborative Manipulation,” Proc. of 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2709-2715, 2000.
- [13] 田中, 辻, 金子: “人間の四肢運動を模擬したロボットの軌道生成法”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.5, pp.699-705, 2000.
- [14] 田窪, 荒井, 林原, 谷江: “人とロボットによる長尺物の協調運搬 (仮想非ホロノミック拘束による水平面内の制御手法)”, 日本機械学会論文集 (C編), vol.66, no.648, pp.2677-2684, 2000.
- [15] 田窪, 荒井, 林原, 谷江: “人とロボットによる長尺物の協調運搬 (仮想非ホロノミック拘束による3次元空間内の制御手法)”, 日本機械学会論文集 (C編), vol.68, no.667, pp.906-913, 2002.
- [16] 佐伯, 小林, 井村, 木村: “連結車両後退運動操作のための制御系設計”, 計測自動制御学会論文集, vol.37, no.8, pp.748-753, 2001.



荒井裕彦 (Hirohiko Arai)

1959年7月9日生。1982年東京大学工学部計数工学科卒業。同年本田技研工業(株)勤務。1984年通商産業省工業技術院機械技術研究所入所。2001年独立行政法人産業技術総合研究所に改組, 現在知能システム研究部門主任研究員。マニピュレータの制御, 非ホロノミック系, パワーアシストなどの研究に従事。工学博士。日本機械学会, 計測自動制御学会, IEEEの会員。(日本ロボット学会正会員)