

仮想アームを用いた人間の 逆運動学解法特性の研究

○大山 英明
機械技術研究所

〒305 茨城県つくば市並木1-2
TEL:0298-58-7298 E-mail:m4310@mel.go.jp

柳田康幸, 舘 暁
東京大学工学部

〒113 東京都文京区本郷7-3-1
TEL:03-3481-4468

あらまし

トレイグジスタンスによるロボットの遠隔制御においては、スレーブアームの運動学的特性が、人間の腕の特性と相似関係にあることが望ましいが、運動学的特性が大きく異なるアームを制御する場合もある。運動学的特性の変化による制御性能の変化を計測して置くことが必要である。人間の逆運動学解法システムの解明は、未だ未解決の問題である。人間の腕の運動学特性を変化させることができれば、人間の逆運動学解法系の知見を得ることが期待できる。これらの目的のために、人工現実感システムの仮想環境中に表示した仮想アームを利用し、その特性を様々に変化させることにより、人間の逆運動学解法システムの特性を解明する実験手法を提案する。

キーワード テレイグジスタンス, 仮想環境, 逆運動学解法システム, 仮想アーム

A Study of Characteristics of Human System Solving Inverse Kinematics Problems by Using Virtual Arm

Eimei OYAMA

Mechanical Engineering Laboratory
Namiki 1-2, Tsukuba Science City, Ibaraki 305 Japan
TEL:0298-58-7298 E-mail:m4310@mel.go.jp

Yasuyuki YANAGIDA and Susumu TACHI
The University of Tokyo
Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku Tokyo 153 Japan
TEL:03-3481-4468

Abstract

An operator in a tele-existence robot control system sometimes operates a slave arm kinematic characteristics of which are different from those of operator's arm. The change of the characteristics of human system solving inverse kinematics problems must be estimated. An experimental method using virtual reality is proposed.

key words Tele-existence, Virtual Environment, Inverse Kinematics Problem, Virtual Arm

1. はじめに

遠隔地にいるロボットの得た感覚情報を操作者に提示し、また操作者の動きに追従してロボットが動くようにする制御方式は、テレイグジスタンス、或いはテレプレゼンスと呼ばれている^{(1)~(4)}。テレイグジスタンスによるスレーブロボットの制御においては、スレーブアームの運動学的特性（対応する部位の寸法、関節角の対応関係等）が、人間の腕の特性と相似関係にあることが望ましいことが判明している⁽⁵⁾。しかしながら、運動学的特性が大きく異なるアームを制御する場合もある。そのような場合において、運動学的特性の変化による制御性能の変化の程度を計測して置くことが必要である。

人間の運動特性を制御・情報論的に明らかにするための研究が行われているが、人間の逆運動学解法システムの解明は、未だ未解決の問題である。人間の情報処理系の特性を解明する有効な実験法として、何らかの手法によって、知覚系や出力系に特性変化をもたらす、トータルな特性の変化を見る手法がある。人間の腕の運動学特性に変化をもたらすことができれば、人間の逆運動学解法システムの知見を得ることが期待できる。既に、宇野らによって、CRT上に表示した仮想アームと人間の腕の関節角との対応関係を変化させ、運動特性の変化を調べる研究が行われているが⁽⁶⁾、CRTディスプレイ上での変更であるため、自らの腕が変化したという臨場感に乏しい。人間が見たままの腕の特性を変化させることができれば、より精密な解析が可能になるものと期待できる。

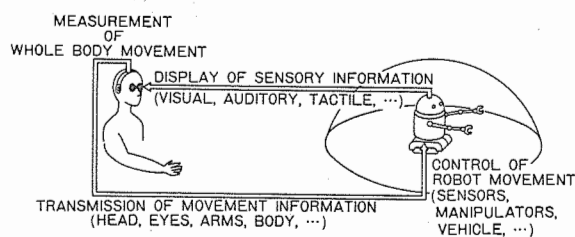
本稿では、これらの目的に有効な手法として、人工現実感システムの仮想環境中表示した仮想アームを利用し、その特性を様々に変化させることにより、人間の逆運動学解法システムの特性を解明する実験手法を提案する⁽⁷⁾。アームの運動学的特性を変化させた場合の、作業性能の変化を調べる実験を行いその結果を報告する。

2. 提案の目的

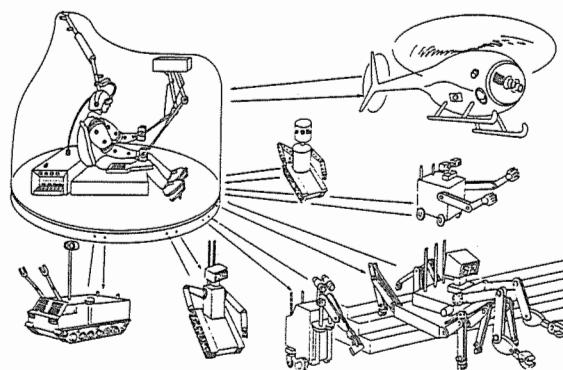
2. 1 テレイグジスタンスからの要請

遠隔地にいるロボットの得た感覚情報を操作者に送り、ロボットが感覚情報を得た状態と同じ状態で操作者に提示し、また操作者の動きに追従してロボットが動くようにすることによって、操作者はあたかもロボットとなったような感覚で、ロボットを自由に制御でき、遠隔地のロボットに人間の高度な認識能力と柔軟な作業能力を実現できる。このようなロボットの遠隔

制御方式はテレイグジスタンス、テレプレゼンスと呼ばれている^{(1)~(4)}。図1にテレイグジスタンスの概念図を示す。著者らは、テレイグジスタンス実験システムを構成した。図3(a)にマスターシステム、図3(b)にスレーブロボットを示す。



(a) Conceptual diagram of Tele-existence



(b) Telerobotic human augmentation system using Tele-existence

Fig.1 Tele-existence

図2に示すように、テレイグジスタンスにおけるスレーブロボットは、人間型が、最も都合が良い。簡単な情報処理で、人間の高度の作業能力をスレーブロボットに付加することができる。単純なテレイグジスタンスによるスレーブロボットの制御においては、スレーブアームの運動学的特性（対応する部位の寸法、関節角の対応関係等）が、人間の腕の特性と相似関係にあることが望ましいことが判明している⁽⁵⁾。

しかしながら、図1(b)に示すように、テレイグジスタンスによるロボット制御においては、運動学的特性が大きく異なるアームを制御することも想定されている。また、既存のロボットにテレイグジスタンスによる操縦機能を付加するような場合も問題となる。スレーブロボットの視覚情報を得るための、ステレオカメラシステムの付加は、比較的容易であるが、ロボットのマニピュレータアームの変更は、困難な場合が多

い。運動学的特性が、人間の腕と大きく異なるスレーブアームを制御する場合や、異構造のスレーブアームを、制御しなければならない場合が生じる。

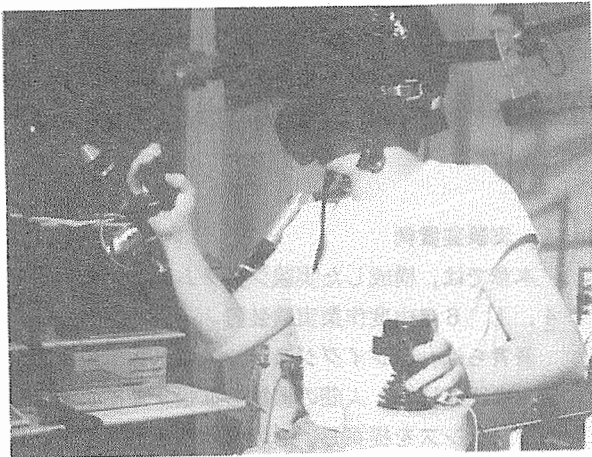


Fig.2 Master system

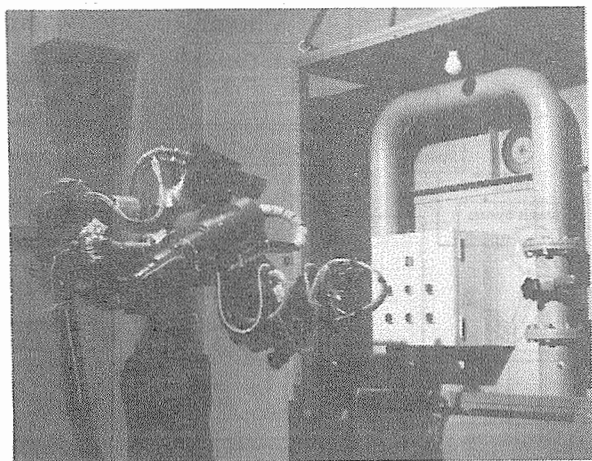


Fig.3 Slave system

運動学的特性が大きく異なるアームを制御する場合、通常、作業特性は悪化する。この弱点の解決法として、仮想環境の利用がある⁽³⁾、^{(8)~(10)}。実環境に存在するスレーブロボットの知能化を進め、自立的に与えられた作業目的を達成できるようになっていけば、オペレータは、仮想環境中で人間型アームを用いて、作業を行い、システムは、仮想環境中でのオペレータの動作から、オペレータの目的を理解し、それを実現するように、スレーブロボットが作業を行うようにすれば、オペレータは人間型アームを操縦しつつ、異構造のスレーブロボットの制御が可能となる。しかしながら、現時点において、実環境のモデル化は非常に難しい⁽⁸⁾、⁽⁹⁾。また、リアルタイムで生成できる仮想環境画像

の臨場感は、カメラから得た実環境画像に遥かに及ばない。

以上のように、運動学的特性が大きく異なるアームを制御する場合において、運動学的特性の変化による制御性能の変化の程度を計測して置くことが必要である。

2. 2 人間の逆運動学解法システムの解明

人間の運動特性を制御・情報論的に明らかにするための研究が行われているが、人間の逆運動学解法システムのシステム論的なモデルの作成は、未だ未解決の問題である。

人間の視覚に基づく運動制御系を解明するために、様々な実験が行われている。人間の情報処理系の特性を解明する有効な実験法として、何らかの手法によって、知覚系や出力系に特性変化をもたらす、トータルな特性の変化を見る手法がある。反転眼鏡等によって、視覚特性の変化をもたらす、視覚認識系や運動制御系の適応機構を調べる研究が行われ、様々な知見が得られている⁽¹¹⁾。また、逆運動学モデルの精度を調べるために、暗室において、手が見えない状態で、光点に対してポインティング動作を行う実験が行われており⁽¹²⁾、⁽¹³⁾、⁽¹⁴⁾、人間の持つ逆運動学モデルの精度が高くないことが判明している。また、手が見えない状態が続くことによる、逆運動学モデルの精度変化についても研究が行われている。

人間の腕の運動学特性に変化をもたらすことができれば、人間の逆運動学解法システムの知見を得ることができるものと期待できる。宇野らは、CRT上に表示した仮想アームと人間の腕の関節角との対応関係を変化させることによって、人間の随意運動特性の変化を見る研究を行った⁽⁶⁾。しかしながら、CRTディスプレイ上での変更であるため、自らの腕が変化するという臨場感に乏しい。人間が見たままの腕の特性を変化させることができれば、より精密な解析が可能になるものと期待できる。

3. 仮想アームを用いた逆運動学解法系の特性測定

館は、人工現実感やテレイグジスタンスの方法の人間の感覚・運動・行動機構の解明を提案している⁽¹⁵⁾、⁽¹⁶⁾。人工的に構成された臨場感の高い環境において、被験者に提示する感覚情報を完全に制御し、被験者の行動を正確に計測し、人間と同等の入出力関係を持つモデルを探し出すことにより、人間の構成的解析モデルを構築するというものである。また、通産省工業技術院の大型研究開発プロジェクト「人間感覚応用計測」

においては、人工現実感技術を用いて、様々な環境情報を人間に提示し、人間の反応を測定ことを目指している。

本稿では、これらの提案を基に、人間の逆運動学解法システムの解明のための有効な手法として、人工現実感システム中の仮想アームを利用した人間の特性測定実験を提案する⁽⁷⁾。

トレイグジスタンスシステムにおいて、スレーブロボットを色々取り替え、作業実験を行うことによって、オペレータの作業能力を測定することが可能であるが、全てのスレーブロボットを用意できるわけではない。仮想環境中に構成した仮想アームは、特性を自由に变化させることが可能であり、あたかもスレーブロボットを取り替えたかのような感覚で、作業特性の測定を行うことができる。

人間の逆運動学解法システムを解明するために、上肢の運動学的な変化に対する逆運動学解法システムの変化を調べることは重要である。人間が見たままの腕の特性を变化させることができれば、精密な解析が可能になるものと期待できるが、人間の腕の運動学的特性を变化させることは困難である。人工現実感システム中の仮想アームを見せ、その特性を变化させることによって、人間が見たままの腕の運動学的特性を变化させた状態を近似的に実現できるものと期待できる。

3. 1 実験装置

提案した実験を行うために必要なハードウェアは、オペレータの上肢関節角を正確に測定でき、オペレータの実環境と一致した仮想環境を生成できる正確にキャリブレーションされた人工現実感システムである。

人工現実感システムにおいては、(I)作業目標の表示、(II)オペレータの関節角の計測と記録、(III)関節角情報を基にした仮想アームの表示、という手順を繰り返す。手順の(III)において、人間の上肢と運動学特性の異なるアームを表示することによって、人間の知覚システムに変化をもたらすことが可能となる。

3. 2 実験内容

仮想アームを用いた人間の逆運動学解法システムの特性測定においては、以下に述べるような実験を行う。

(1)異構造スレーブアームによる作業実験

仮想アームとして、寸法、形状を変えた人間型アームの他、代表的なロボットアームについて、積み木作業を行い、作業時間を計測して、特性の変化を調べる。

(2)目標追従実験

点目標に対して、手先の追従運動を行い、手先の

追従特性の変化を見る。逆運動学モデルとフィードバック回路から成る逆運動学解法システムの数式モデルを用いて、データの当てはめによる解析を行う。

(3)視覚外乱に対する応答実験

直線軌道等の既知の軌道追従運動において、仮想アームの先端位置・姿勢を、突発的に変更し、応答特性を調べる。(2)と同様に数式モデルによる解析を行う。

4. 実験装置例

本章では、構成した実験システムについて報告する。

4. 1 6自由度作業実験装置

著者らは、トレイグジスタンスに、人工現実感システムを組み込み、人間の機能の拡張する拡張型トレイグジスタンスを提案し、その有効性を実証するために、拡張型トレイグジスタンス実験システムを構成した^{(8)~(10)}。

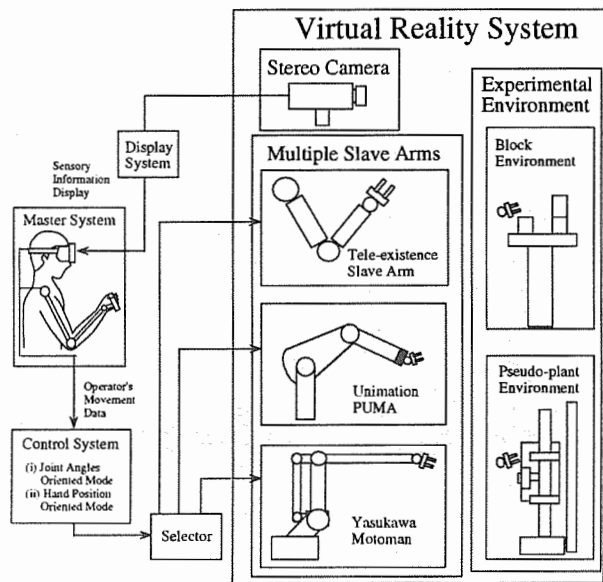


Fig.4 Extended tele-existence system with virtual arms

スレーブアームは人間類似型アームであったが、今回、スレーブアームの運動学特性を変えたアームを用意し、さらに、幾つかの、代表的な産業用マニピュレータを用意した。図4にシステムの概念図を示す。マスターアームと同構造のスレーブアームの操縦においては、マスターアームの関節角をそのままスレーブアームで実現する操縦モードとマスターアームの先端の位置・姿勢とスレーブアーム先端の位置・姿勢が一致するようにする操縦モードを用意する。異構造のスレ

一ブームの操縦においては、スレーブアーム先端の位置・姿勢と、マスターアームの先端の位置・姿勢が一致するように操縦を行う。

4.2 2自由度平面運動実験装置

前節で述べたトレイグスタンスシステムのマスターアームは重く、高速な運動について測定を行うことは難しい。高速な運動について測定を行うために、平面上の2自由度運動について、図5のような実験装置を構成した。

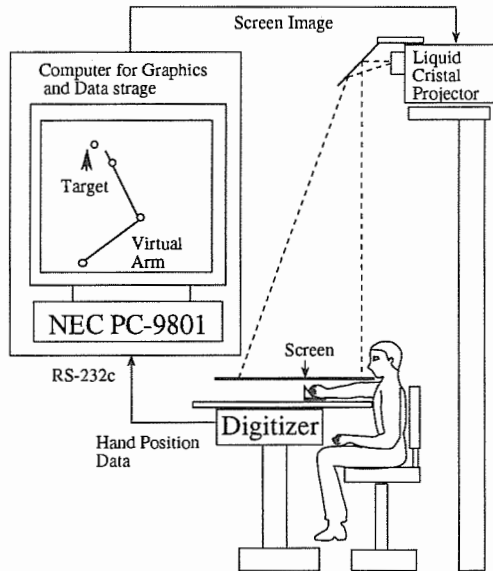


Fig.5 Configuration of 2D virtual arm experimental system

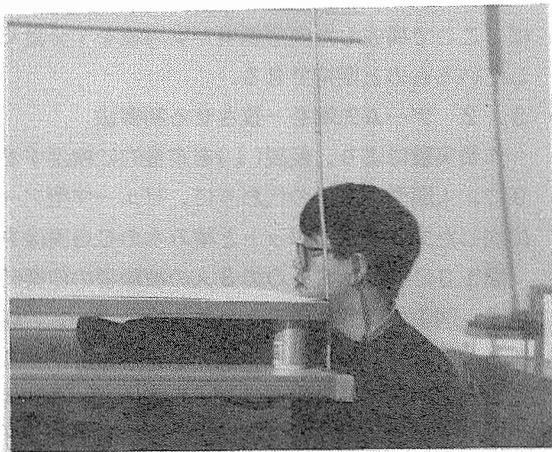


Fig.6 2D Virtual arm experimental system

図5の液晶プロジェクターは、画像表示およびデータ記録のための計算機PC-9801の画面を、デジタイザの上にあるスクリーン上に投影する。デジ

タイザ上のスタイラスペンによって、手先位置を計測し、人間の腕の逆運動学モデルから、肘関節と肩関節の角度を測定することができ、それを基に、仮想アームの表示を行う。図6に、実験時の被験者の様子を示す。ただし、実験時には、照明を暗くするものとする。

現時点において、デジタイザの時間分解能は、5 msecであり、また、データ転送に、数msecかかるため、非常に高速な運動への追従は難しい。

4.3 6自由度運動実験装置

現在、高速な6自由度運動の計測を行うために、軽量の7自由度マスターアームを用いた人工現実感システムを利用した計測装置を開発中である。

5. 実験

アームの運動学特性の変化による作業性能の変化を見るために、仮想アームを用いて、積み木作業を行い、その時間を計測した。

著者らは、これまでの、トレイグスタンスによるロボット制御において、以下のような経験的・定性的仮説を持っている。

- (I)スレーブロボットのエンドエフェクターの運動がマスターアームの先端の動きに一致している場合、スレーブアームとマスターアームの運動学特性に大きな違いがあっても、作業性能の変化は小さい、
- (II)アームの寸法変化に対して、人間の適応能力は高い。
- (III)アームの関節角オフセットに対しては、オフセットに応じて制御性能は悪化する。
- (IV)アームの関節角の動作方向が異なる場合、制御は難しい。

今回の作業実験では、以上のような仮説の検証を行う。

5.1 作業内容

まず、作業内容について、具体的に述べる。図7に示すように、ロボットと積み木作業台が配置されているものとする。

被験者は作業の前に、1分間、マスターアームを前後、左右、上下に動かしてスレーブアームの操縦法を覚える。その後、図8に示すように、次のような作業を行う。

- (1)ジョイスティックによりロボットの向きを右前方にある積み木台の方へ向ける。

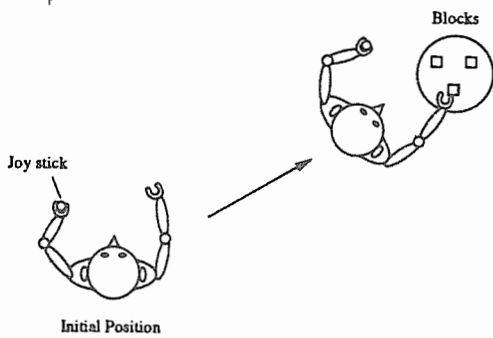
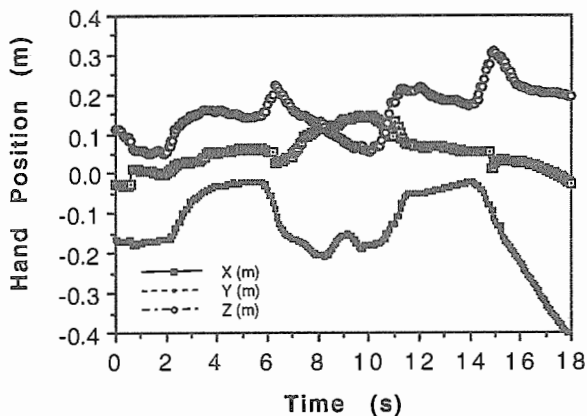
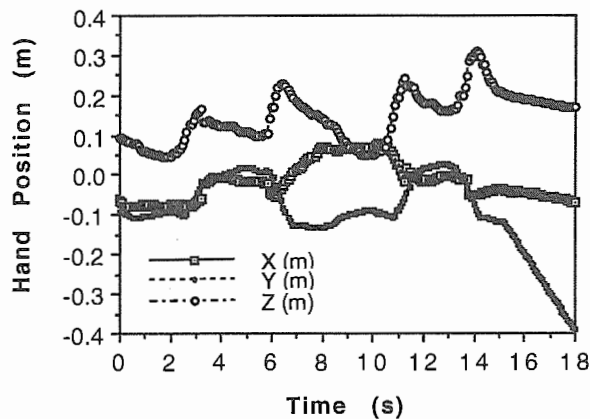


Fig.7 Experimental operation



(a) Real environment



(b) Virtual environment

Fig.8 Trajectory of hand position during experimental operation

(2) ジョイスティックより作業可能な位置に移動する。

(3) 3個の積み木を1列に積み上げ、積み降ろす。

(1)から(3)にかかる時間を作業時間として測定する。積み木作業に失敗することなく、5回の作業に成功した時点で、成功した作業の平均作業時間によって、作業性能の評価を行う。積み木作業においては、積み木を落としてしまうなど、しばしば、作業に失敗することがある。今回の作業実験では、失敗した試行は評価に入れない。

図8に、熟練者による積み木作業時におけるスレーブロボットのハンドの3次元位置 (x, y, z) の軌跡の例を示す。座標原点は積み木を乗せるテーブルを構成する円盤の中心に固定されており、 x 軸がほぼロボットを向いており、 z 軸は床面に対する垂直軸に一致し、 y 軸は他の軸と右手系を成すように定義されている。

図8の(a)は、実環境中での作業におけるハンド位置の軌跡であり、(b)は仮想環境中での作業におけるそれである。実環境中でのハンド位置は、スレーブロボットの位置・姿勢とアームの関節角から計算している。これは、三つの積み木を1列に積み上げている作業を行っているところである。ただし、仮想環境中の積み木の位置・姿勢と実環境中のそれとは、正確にキャリブレーションされているわけではない。

実環境と仮想環境の類似性を一般的な意味で客観的に評価することは難しいが、図9に示されるように、実環境での作業におけるハンド位置の軌跡と仮想環境におけるそれが、非常に良く似ていることを考慮すれば、ここで構成した仮想環境が実環境を十分良く近似しているものと期待できる。

5. 2 アーム先端を一致させる制御法

作業実験により、仮説(I)を定量的に検証する。図9に、人間型アームの代わりに、ビューマ型アームを付加したスレーブロボットと積み木のCG画像を示す。

図10に、Y, S, Oの3人の被験者の作業時間を示す。図中のTELESARは人間型アームの場合であり、PUMAはビューマ型アームの場合である。カッコの中の英字は被験者に対応している。被験者Yを除いて、作業時間は、人間型アームの場合も、ビューマ型アームの場合も変わらない。ビューマ型において、作業性能が低下した、被験者Yによれば、ビューマ型アームの操縦性は、人間型アームと変わらないが、画面更新のスピードが遅いため、作業時間が長くなったとのことである。PUMA型アームの場合、現時点において、無駄の多い逆運動学の計算のため、画面の更

新速度が2/3程度に低下しており、それが作業時間に悪影響を与えたものと考えられる。

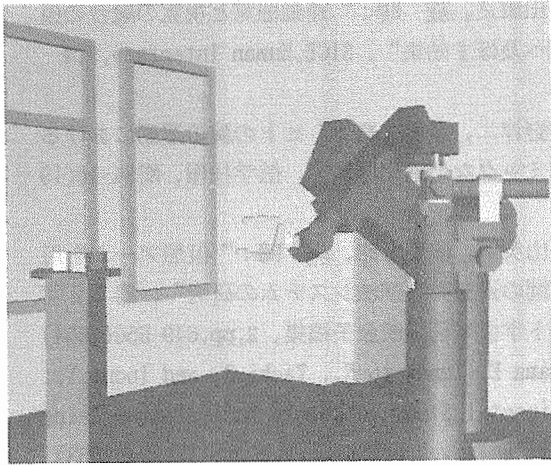


Fig.9 Slave robot with PUMA arm

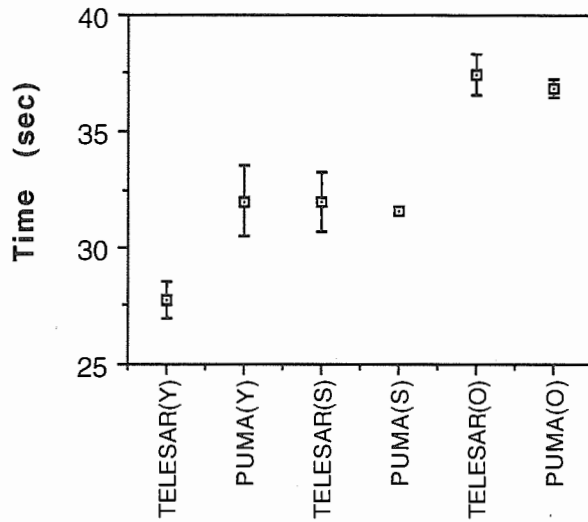


Fig.10 Results of experimental operations

5.3 アームの変形の影響

仮説(IV)を検証するために、肘関節の角度をマスターアームの肘関節の角度を θ とし、スレーブアームの肘関節の角度を θ_{es} とし、

$$\theta_{es} = \pi / 2 - \theta.$$

となるようにスレーブロボットの制御を行った。5分間程度の比較的短期的な練習では、全く操作不可能であり、積み木作業を行うことはできなかった。よって、仮説(IV)を次のように修正する。

(IV)' アームの関節角の動作方向が異なる場合、制御はほとんど不可能となる。

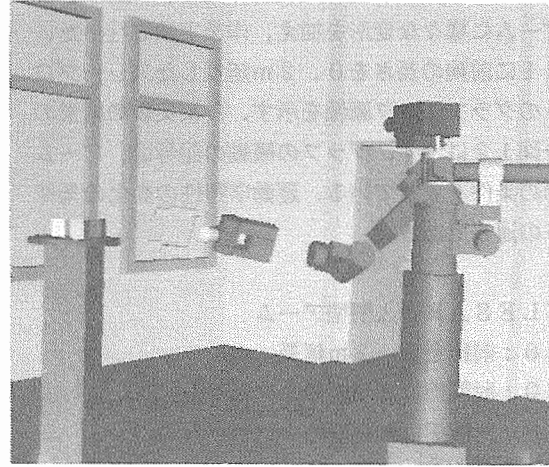
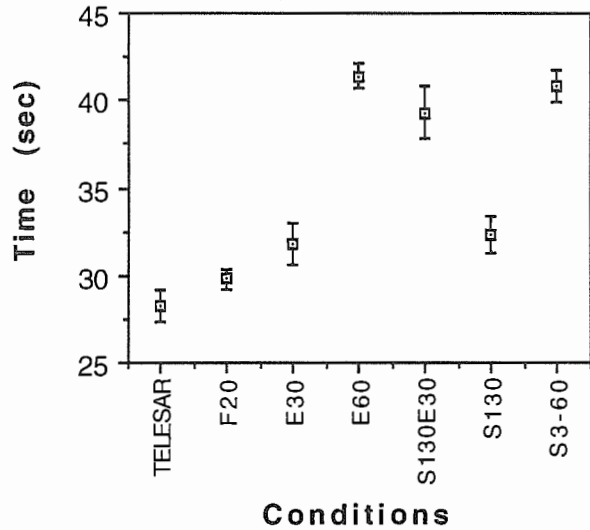
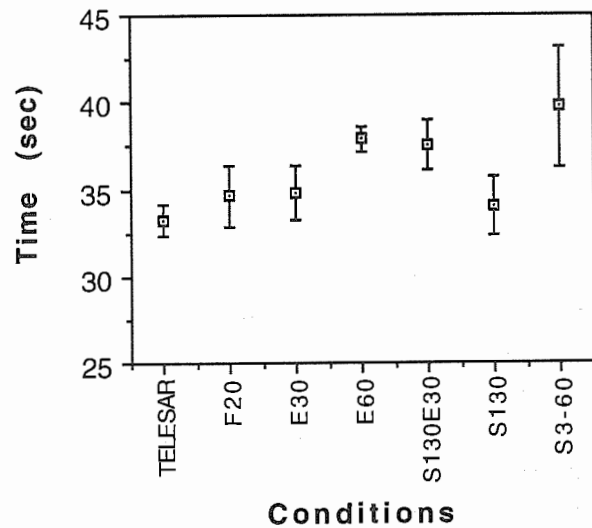


Fig.11 Slave system with modified arm



(a) Subject:Y



(b) Subject:T

Fig.12 Results of experimental operation

さらに、仮説(II), (III)を調べるために、仮想スレーブアームに様々な変形を加え、作業実験を行った。

図11に前腕の長さを0.2m延長したスレーブロボットのグラフィック画像を示す。作業実験の結果の一部を図12に示す。グラフの横軸の記号は、アームの変形の条件を表している。運動学特性の変化の条件は以下の通りである。

- TELESAR: 人間型アーム
- F20: 前腕を0.2m延長
- E30: 肘関節に30度のオフセット
- E60: 肘関節に60度のオフセット
- S130E30; 肩第一関節に30度のオフセット, 肘関節に30度のオフセット
- S130: 肩第一関節に30度のオフセット
- S3-60: 肩第三関節に-60度のオフセット

作業実験の結果、仮説(II), (III)の成立が確認された。関節角のオフセットに関しては、2次関数的に作業時間が増大している。

先にも述べた通り、目標追従実験や外乱応答実験を行おうとしたが、マスターアームが重すぎるため、高速な運動に追従することは不可能であった。

6. おわりに

トレイグジスタンスにおいて、スレーブアームの運動学的特性の変化による作業性能の変化の程度を計測するため、また、人間の逆運動学解法システムの知見を得るために、仮想環境中の仮想アームを利用した実験法を提案した。作業実験を行い、運動学特性の変化によるトータルな作業性能の変化を測定した。

現在、より精密な解析を行うため、2自由度平面運動実験装置を利用して、基礎的なデータを収集中である。実験結果を、研究会では発表する予定である。

参考文献

- (1) 舘 暁, 谷江 和雄, 小森谷 清: "感覚情報呈示機能をもったマニピュレータの操縦方式", 特許1348263号, 出願1981年1月14日
- (2) 舘 暁: "テレロボティクスとトレイグジスタンス", 計測と制御, 28, 12, pp.1059-1064(1989)
- (3) 舘 暁, 前田太郎: "人工現実感を組み込んだトレイグジスタンスシミュレータ", 電子情報通信学会論文誌, JD75-D-II, pp.179-189(1992)
- (4) Akin D.L., Minsky M.L. et al., "Space

application of automation: Robotics and Machine Intelligence Systems (ARAMIS)-Phase II," NASA Contract Report 3734(1983)

(5) 柳田康之, 舘 暁: "運動感覚と視覚の融合の仮想環境へ及ぼす効果", SICE, Human Interface, 9, 4 (1994)

(6) 宇野洋二, 今水 寛: "ヒトの腕の運動におけるダイナミックな最適化原理", 信学技報, NC94-16(1994)

(7) 大山英明, 前田太郎, 舘 暁: "仮想アームを用いた人間の逆運動学解法システムの研究", 第12回ロボット学会学術講演会予稿集, 2, pp.649-650(1994)

(8) Oyama E., Tunemoto N., Tachi S. and Inoue Y.: "Experimental Study on Remote Manipulation Using Virtual Reality," PRESENCE, 2, 2, pp.112-124(1993)

(9) 大山英明, 常本直貴, 舘 暁, 井上康之: "仮想環境と実環境の重ね合わせの一手法", 日本ロボット学会誌, 2, 2, pp.272-281(1994)

(10) 大山英明, 常本直貴, 前田太郎, 舘 暁: "仮想環境へのトレイグジスタンスのための一手法", 日本ロボット学会誌, 12, 8, pp.1175-1182(1994)

(11) Stratton G.: "Some preliminary experiments on vision without inversion of the retinal image." Psychological Review, 3, pp.611-617(1896)

(12) 樋口正浩, 山崎興八洲, 笠井健: "視覚系と運動系の3次元位置の対応付け(キャリブレーション機構)", 信学技法, MBE86-82(1987)

(13) 常本直貴, 舘 暁: "視覚フィードバックを伴わない位置決めについて", 第28回計測制御学会学術講演会予稿集, pp.39-40(1989)

(14) 前田太郎, 舘 暁: "視覚性到達運動における両眼視と上肢位置感覚の統合", 計測自動制御学会論文誌, 32, 2, pp.201-210(1993)

(15) 舘 暁: "トレイグジスタンスの認知的制御", バイオメカニズム学会誌, 14, 1, pp.3-9(1990)

(16) 舘 暁: "人工現実感と運動/行動の制御", 計測と制御, 33, 4, pp.316-320(1994)