

身体障害者のQOL(生活の質)を大幅に向上させる 高機能電動車いすの研究開発

ー 操作検証用マニピュレータの設計製作 ー

千原 健司 藤井 勝敏 稲葉 昭夫 西嶋 隆

Design and Production of Manipulator for Operation Verification

Kenji CHIHARA Katsutoshi FUJII Akio INABA Takashi NISHIJIMA

あらまし 本研究所では、本年度より3ヵ年計画で早稲田大学および榊今仙技術研究所と共同し、身体障害者のQOL(Quality Of Life:生活の質)を大幅に向上させる高機能電動車いすの研究開発に着手した。この電動車いすは、身体障害者の上肢による作業を支援するための軽量で安全なマニピュレータと、電動車いす・マニピュレータおよび家電製品などを統合的に扱う多機能指示端末を有することを特徴とする。本報告では操作検証用として、電動車いすに搭載可能な、コスト面で実現性のあるマニピュレータを試作したので報告する。

キーワード 軽量マニピュレータ、電動車いす

1. はじめに

技術戦略マップ2006^[1]において、我が国の工業分野で使用される産業用マニピュレータは成熟期であるのに対し、人がいる環境でも使用可能な、軽量で安全なマニピュレータが、次世代のロボット技術の一つとして必要であることが示唆されている。特に人に対する安全の確保に対し、技術的にも制度的にも更なる検討が必要とされ、そのロードマップによると、技術確立の達成目標は2010年頃となっている。そのため、福祉分野で安全・安価なマニピュレータが必要とされているにも関わらず、このようなマニピュレータは現地点ではほとんど販売されない。研究用として(株)AAIジャパン^[2]などから販売されているが、実用目的ではなく価格も高価である。

また、欧米では車いす搭載用マニピュレータとして蘭ExactDynamics社の「ARM」^[3]や米RehabilitationTechnologies社の「Raptor」^[4]等がこれまで先行して開発されているが、介護現場に普及するには至っていない。これは、価格やサイズあるいは操作性などについて、ユーザーや装置導入者のニーズに合致していないことが原因と考えられる。

そこで我々は開発当初から対象ユーザーおよび福祉支援従事者らを開発に参画していただき、意見を設計に反映させるとともに、価格・重量・サイズ・操作性という点において、従来開発品との差別化を図ることとした。

本報では、機構の基本動作を確認するための0号機、および0号機を改良し電動車いすに搭載可能な1号機の2台を試作したので、それぞれ報告する。

2. 基本設計

2. 1 指針および手法

前章で述べたように低価格、軽量化、コンパクト、高い操作性を追求し、合わせて、安全に十分に配慮した設計を行う。具体的にはそれぞれ以下の手法を採る。

○低価格

- ・ある程度の用途を限定し、マニピュレータの自由度(関節数)を最小限に配置する。ニーズ調査に基づく用途の限定については、調査報告^[5]を参照にされたい。
- ・コストパフォーマンスの高い標準部品を使用する(ホビーロボット用サーボモータ、標準機械部品等)。

○軽量化

- ・3DCADによる設計と並行して、強度計算を十分に行い、必要最小限の材料を適所に配置する。

○コンパクト

- ・車いすメーカーと共同開発し、車いすを含む設計データを共有することにより、マニピュレータをコンパクトに配置する。

○高い操作性

- ・ユーザーが使い慣れた電動車いす用の標準的なジョイスティックから操作可能とする。
- ・操作中に把持力を設定可能とし、柔らかいものから固いものまで、使用者が特に注意することなく把持可能とする。

○安全性

- ・自重を構造が支える機構(スカラ型)とし、電源遮断時でも状態を維持可能とする。

- ・低出力のアクチュエータを使用する。
- ・モータゲインを抑制し、最大トルクを制限する。
- ・粘弾性をもつ被膜で各部品を覆い、衝突による衝撃を吸収する。
- ・挟み込みに配慮した機構とする。

2. 2 目標価格および仕様

目標価格はメーカーの意見から、電動車いすのオプションとして販売可能と考えられる50万円程度と設定し、試作機では材料費と加工費で50万円以内に収めることを目標とした。

重量は健常者が無理なく持ち運べる7kg以内とし、寸法は狭い日本家屋内での移動を想定し、マニピュレータ収納時に電動車いすに対し前後左右にはみ出ない大きさとする。また目標タスクを調査報告^[5]に基づき、①棚にあるペットボトル等を取って顔の近くまで運ぶ、②床に落ちたリモコン等を取る、③カーテンを開ける、の3つに設定し、これを達成可能とする目標仕様を表1に記す。

3. 0号機の設計製作

安価な構成部品を使用して、目標とする機能が実現可能か確認するため、0号機の設計製作を行った。

3. 1 機構設計

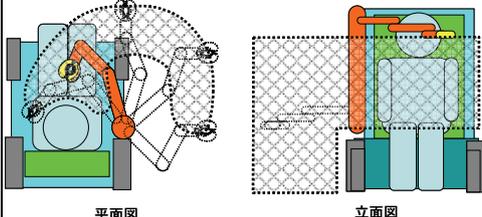
3. 1. 1 リンク構成

リンク構成を図1に示す。上下直動1軸、ヨー3軸、ハンド開閉1軸の計5軸の構成とした。これは、手先のピッチ・ロール方向は水平に固定されるが、位置とヨー方向を任意に指定できる最小の軸構成である。垂直駆動軸の減速にウォームギアを使用し、水平方向は構成部品で支持することにより、電源遮断時でも位置が保たれ安全である。また小さい電力で駆動が可能である。

3. 1. 2 アームの設計

設計は、3DCAD (SolidWorks2005) を用い、各構成部品の組付けをモデルで確認しながら、機械的干渉や総重量を検査した。強度設計に関しては構造解析ソフト (COSMOSWorks) を使用した。図2に組立モデルを、図3にアーム部分の強度解析の一例を示す。先端に1kgの荷重を掛けたときに先端最大変位が2mm以内、安全率4以上になるように設計した。構成部品は、部品コスト削減と設計の効率化のために、CADデータが公開されている標準部品(株)ミスミ製)を積極的に採用した。構造で配慮した点は、断面2次モーメントが断面積に対し効果的に高くなる中空角材を各リンクに採用した点、応力が集中する各軸は鉄系材料をその他は軽量化のためアルミ系材料を採用した点、先端に近いアームの横部分は応力が比較的低いので軽量化のため円状に切り欠いた点、各アームの軸受としてラジアル方向とスラスト方向の力を同時に受けることが可能な溝の深い玉軸受けを採用した点、アーム上下動のための電力を軽減するためにカウンタウェイトを支柱内に配置した点等である。

表1 目標仕様

可搬重量	500[g]	
最大速度	20[cm/sec] (ハンド先端部分, 設定可能とする)	
最大作用力	10[N] (ハンド先端が水平方向に及ぼす力)	
可動範囲	<p>上下: 床面 ~ 顔の付近 左右: アーム取付方向50cm~反対方向の顔の側面 前後: 車いす先端より10cm ~ 顔の付近</p>  <p>棚に置かれた物や壁のスイッチなどは、主に車いす側面で扱うことを想定</p>	
ハンド	把持力	10~30[N]程度まで、操作中に3段階程度に制御可能とする
	想定対象物	リモコン、ペン、ペットボトル飲料、プッシュスイッチ、カーテン等を扱える形状とする

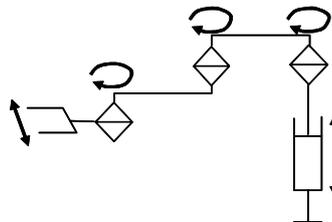


図1 マニピュレータのリンク構成

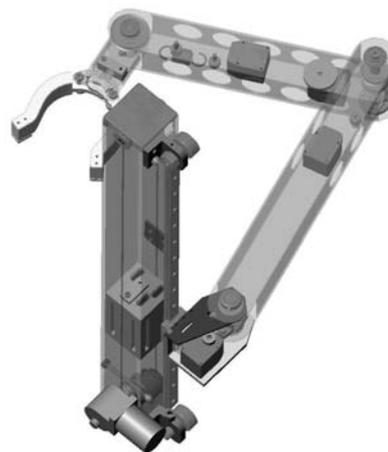


図2 0号機の組立モデル



図3 アームの強度解析の一例（応力分布）

3. 1. 3 ハンドの設計

ハンドは、できるだけ少ない構成部品で様々な形状の物を扱えることを目標に設計した。図4に組立モデルを示す。サーボモータ出力が、2段の歯車を介して2つの双対するアルミ製ハンドに伝達され、開閉する。ハンドは根元から、くの字に曲がった部分とその先の平らな部分とからなり、くの字の部分で円筒状の物など大きいものを、平らな部分で小さい物を把持する。また、くの字の中央部分に円状の切欠を設け、板バネ要素とし、サーボモータの位置制御により手先の把持力を制御することを可能とした。図5にハンド単体の強度解析の一例を示す。先端の平らな部分に5kgfの荷重が生じた場合に約2mmたわむように設計した。なお、応力は切欠部分で最大であるが、その安全率は1.6程度であり、通常で使用すれば塑性変形はしない。

3. 2 電装設計

電装部品はトルク等の要求仕様を満たし、なおかつ安価であることを基準とし選択した。水平3軸およびハンドを駆動するアクチュエータには、ホビーロボット等で使用されているサーボモータ（近藤科学㈱，KRS-4014HV）を採用した。本モータは小型軽量、コントローラとメタルギアを内蔵、サーボ特性が軽便に変更可能といった特徴を有する。また垂直方向のアクチュエータはゲーム機の昇降装置等に使用されているウォームギアドモータ（ツカサ電気㈱，TG-85B-WM）をモータドライバ（同社製，TCP-S30）と合わせて採用した。

全体を制御する基板は、㈱ESP企画のIF6-SH2を採用した。これは㈱ルネサステクノロジーのマイクロプロセッサSH7144Fに周辺部品を実装した基板であり、最大48MHz

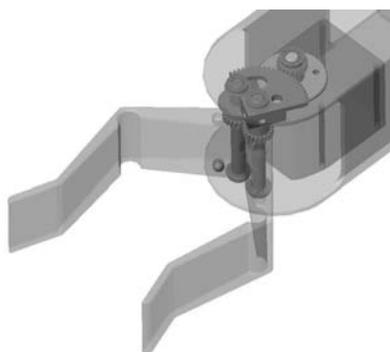


図4 ハンドの組立モデル



図5 ハンド単体の強度解析の一例（応力分布）

（周辺機器は24Mz）で動作し、ADコンバータ、PWM出力、SCI通信、I/Oポート数など制御に必要な機能を備えている。

回路ブロック図を図6に示す。図中の電流検出回路は、ハンドを駆動するサーボモータの電源線に流れる電流を検出し、把持力を制御するために使用する。

3. 3 制御プログラム

図7に制御フロー図を示す。制御タスクはメインタスク、受信タスク、リアルタイムタスクで構成する。メインタスクは初期化処理を行った後、受信フラグ成立時にコマンドを解釈し、各軸軌跡のバッファ書き込み処理等を行う。受信タスクは、指示を与えるホストPCからの受信割り込み処理であり、コマンドを蓄積する。リアルタイムタスクは、7msec間隔で発生する割り込み処理であり、軌跡バッファに蓄積された角度に応じたモータ制御信号をPWMで各軸に指令する。割り込み処理開始時からのタスク優先度は、受信タスクを最優先とし、リアルタイムタスク、メインタスクの順にした。

表2に制御コマンドの一覧を記す(1号機での拡張部分を含む)。電動車いすを操作する標準的なジョイスティックを用いて操作ができることを念頭に置きコマンドを定めた。基本的には、外部からコマンドを与えるマイコン等（以下、ホストPCという）で逆運動学計算等の計算をすることなく操作可能とするため、水平面での前後左右移動のほか、手首、ハンド、垂直方向の単独駆動コマンド、指定位置への移動コマンド等を実装した。更に、ホストPCにより外部との機械的な干渉を回避したり、逆運動学計算により各関節軌道を与えたりする場合を想定して、各軸の角度指定コマンドも実装した。

なお水平面移動での逆運動学計算については、1号機について次章述べることとし、0号機では省略する。

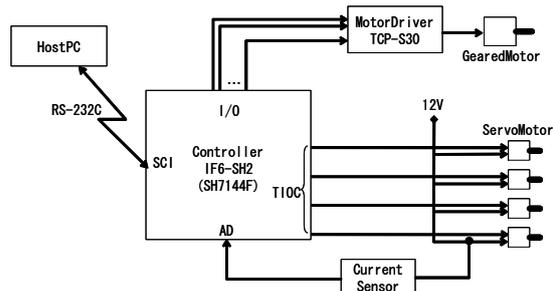


図6 回路ブロック図

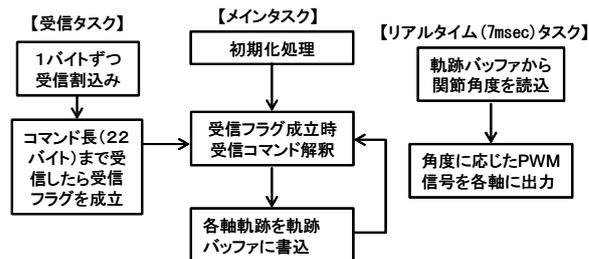


図7 制御フロー図

表2 コマンド一覧

動作内容	受信間隔	
水平面の移動	50[msec]毎に 繰返し受信	
		左
		右
奥		
手首のみ駆動		手前
		左向
ハンドのみ駆動		右向
		つかむ
各軸の角度指定動作		はなす
		垂直方向の移動
把持力の変更	上	
	下	
	目標へ	
指定位置へ移動	弱	
	中	
	強	
停止	横エリア	
	前方エリア	
	正面エリア	
各軸の角度指定動作	収納	
DCモータの目標値設定		
各軸角度の取得		



図8 0号機

3. 4 基本動作の確認

図8に製作した0号機の写真を示す。重量は約8.1kgで目標よりやや重い。アームを一直線にして先端に1kgの重りを載せた場合の先端での変位は1.16mmであり事前のシミュレーション結果0.45mmと比較して2.5倍程度大きい。これはシミュレーションモデルで省略したベアリングやネジ部分での変位が加わったものと推測されるが、その値は目標範囲内であり、剛性は十分に高いと言える。また、1kgの重りを先端に載せて各関節を動かしたが、各関節ともスムーズに可動し、各機械構成部品が十分使用に耐えうることを確認した。

次に動作確認として、約500gのペットボトルをつかみ上下左右前後に移動させることを試みた。事前に把持力を設定することにより、ハンドの開閉具合を操作者が調整することなくペットボトルを把持することが可能なことを確認した。また、ペットボトルを上下左右前後に運ぶことが可能であることを確認した。この時の消費電力は、駆動時最大12W程度、待機時は3W程度と省電力であり、スカラ型軸構成の利点を確認した。また、材料費は約25万円、加工費は約20万円となり目標内に収まった。なお、最大速度、水平方向作用力、ハンド把持力の確認については、1号機について次章で述べることとし、



図9 1号機の組立モデル(左:側面図, 右:上面図)

0号機では省略する。

課題としては、挟み込みが生じそうな部位があること、軸の固定方法に問題があり滑りが生じる軸があること、依然として重量感(威圧感)があることが残された。

4. 1号機の設計製作

0号機に残された問題点を踏まえ、電動車いすに搭載可能とした1号機について述べる。

4. 1 改良時の留意点

以下の点に留意し0号機を改良し、1号機を製作する。

- ① ノーマル型の電動車いすに搭載可能とし、かつ床に落ちている物も取れるような構造とする。
- ② マニピュレータがコンパクトに収まるようにする
- ③ 挟み込みが生じそうな部位を改良する。
- ④ 滑る軸があるので軸の固定方法を改良する。
- ⑤ 部品点数を減らし、総重量を減らす。
- ⑥ デザインに配慮する。
- ⑦ 目視で行っていた上下移動を半自動化する。

具体的に行った方策について、機構と電装に分け、以降に述べる。

4. 2 機構設計

図9に1号機の組立モデルを示す。留意点①に対し、支柱を前輪と後輪の間を斜めに通してマウントすることにより、関節数を増やすことなく床のものを取ることを可能にした。また留意点②に対し、収納時に上下左右前後に車いすから大きくはみ出ないように配置した。いずれも、車いすのCADデータをメーカーと共有して設計することによりコンパクト性が図られた。

留意点③に対し、アームは全て上下方向にオフセットを持たせ連結し、約30mmの間隔を確保した。この設定値は、福祉用具の安全に対する一般要求事項から、指の挟み込み防止(4mm未満もしくは25mm以上)と頭の挟み込み防止(60mm未満もしくは300mm以上)の両方を満たす要件として決定しており、このことにより安全性を確保している。このほか安全に関しては、事故によりアームに重い荷重がかかることを想定し、10kgfまで耐える(塑性変形しない)ように構造の見直しを図った。

留意点④に対し、軸を固定するネジ径を変更し、防止を図った。留意点⑤に対し、カウンタウェイトの削除などにより部品点数を減らし軽量化を図った（ネジなど小物を除く部品点数 91 点→75 点，重量 8.4kg→5.5kg）。留意点⑥に対し、黒を基調とした外装を設計し、デザイン性に配慮した。

その他、側面から見た場合、支柱とアーム付根部分との間にユーザーが座ることになり、それに対し前方での作業が想定されるため、アーム付根を前方へ張り出したほか、中空ジョイント・中空軸を採用しアーム内に配線できるようにした。

4. 3 電装設計

1号機の回路ブロック図を図10に示す。留意点⑦に対し、ギアドモータに連結したポテンショメータを追加しアームの上下位置を取得するほか、アームの上下先端にリミットスイッチを取り付けた。これらのセンサは全自動のために利用するのではなく、手動で操作する前に常にセンサ値を確認してから駆動する目的で利用する。これにより半自動的な操作となるが、万一センサが故障した場合でも操作を中断すればアームが止まるため安全である。

その他、サーボモータへの信号伝送方式を、各モータへPWM信号を個別に送信する方式からシリアル通信によるマルチキャスト方式へと変更した。これにより信号線が1本となり、配線がシンプルになるほか、本サーボモータの機能を使用することでサーボゲインなどのパラメータを駆動中に変更可能となる。このサーボゲインを変更することにより、力を制御する仕様に変更した。

4. 4 制御プログラム

センサ情報の処理部分を追加し、サーボモータへの命令方法を変更したほか、リンクの長さを変えたので逆運動学計算部分を変更した。ここでは、前章で省略した水平面移動時の逆運動学計算について述べる。

リンク構成とパラメータ定義を図11に示す。水平面移動時には、手首根元部分 P(X,Y)の位置を、操作者に対して手首の角度を一定に保つように手首角度 θ_3 を補償しながら、前後左右に移動させる。ここでアーム L_1 の根元を原点0とし図のように座標系を設定すると、P(X,Y)は

$$\begin{cases} X = -L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ Y = L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (1)$$

となる。式(1)をそれぞれ時間で微分すると

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = -L_1 \sin \theta_1 \cdot \frac{d\theta_1}{dt} - L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot \left(\frac{d\theta_1}{dt} + \frac{d\theta_2}{dt} \right) \\ \frac{dY}{dt} = L_1 \cos \theta_1 \cdot \frac{d\theta_1}{dt} - L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot \left(\frac{d\theta_1}{dt} + \frac{d\theta_2}{dt} \right) \end{cases} \quad (2)$$

ここで微小時間に進む距離を Δl とすると、前後に移動する場合は、 $dX/dt = 0$, $dY/dt = \Delta l$ を、左右に移動する場合は、 $dX/dt = \Delta l$, $dY/dt = 0$ を式(2)に代入し、それぞれ $d\theta_1/dt$, $d\theta_2/dt$ について解けば、微小時間での θ_1 , θ_2 の命令角度が計算できる。手首角度 θ_3 はの時間微分は、

$$d\theta_3/dt = -d\theta_1/dt - d\theta_2/dt \quad (3)$$

となる。なお、計算結果については省略するが、sinとcosだけの簡単な式となり高速な計算が期待できる。

4. 5 基本動作の確認

図12に製作した1号機の写真(外装無し)を示す。写真右はアーム本体、左は制御ボックスである。制御ボックスの寸法は200 mm×170 mm×50 mmとし、車いすの座席下に収納可能な寸法とした。重量はアームが約5.5kg, 制御ボックスが約0.7kgで、両方合わせて約6.2kgであり目標

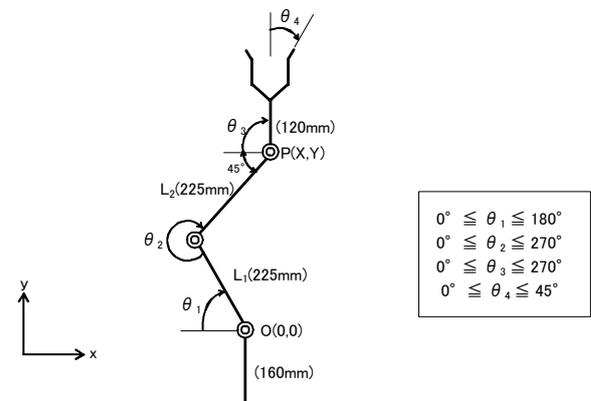


図11 リンク構成およびパラメータ定義

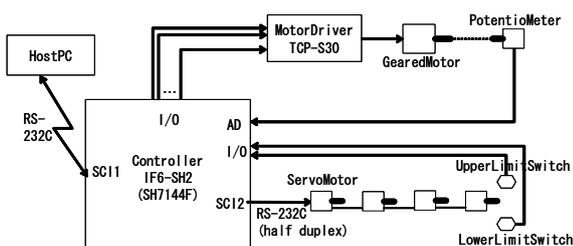


図10 回路ブロック図

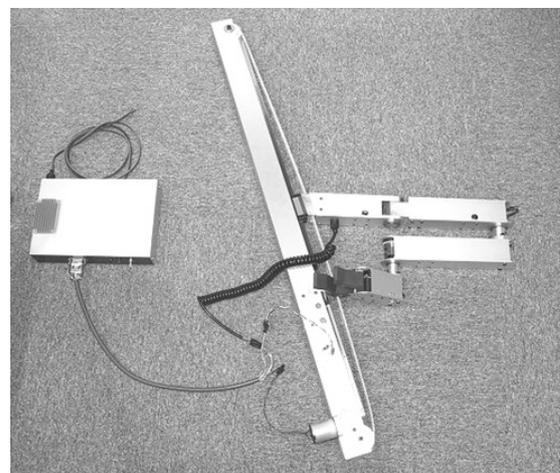


図12 1号機 (外装無し)



図13 車いすに装着した1号機（左：収納時，右：作業時）

内である。材料費は約23万円，加工費（外装除く）は約22万円で目標内である。図13に外装を取り付け電動車いすに装着した1号機の写真を示す。アーム関節部の外装はナイロン粉体造形により製作した。アーム周辺は市販の亚克力・ウレタン・ゴムの共重合発泡体（反発弾性率0.1%以下）で覆うことにより，人と衝突した場合の衝撃を緩和可能である。関節部のナイロン粉体造形費用は，50万円程度と高価であるが，将来的には金型樹脂成型で製作する予定である。

次に，ハンド先端部分の移動速度，水平面での作用力，およびハンドの把持力を測定した。ハンド先端の移動速度は，車いすの真横から前方に移動させる際にかかる時間を計測することで測定した。その結果は約40cm/secであり，表1の目標を大幅に上回ることを確認した。水平面での作用力は，バネばかりによる引っ張り試験で測定した。結果を図14に示す。図左は横位置での，図右は前方位置での測定結果をベクトル表示したものである。アーム位置および作用方向によって作用可能な力の大きさが変わることが分かる。目標タスクであるカーテンを開ける作業は，カーテンの重さによってアーム位置と作用方向を適切に選ぶことが必要であるが，作業は可能であるといえる。

ハンドの把持力は，重量はかりの基台と受皿部分にそれぞれ治具を固定し，ハンド先端でその治具を挟むことにより測定した。その結果，10N，14N，18Nと3段階に把持力を変更できることを確認した。

目標タスクの実現確認として，約500gのペットボトルをつかみ移動させる実験を試みた。基本的には問題なく把持して移動させることが可能であったが，高速（約40cm/sec）で移動させた場合には，慣性力による過負荷によりタイミングベルトに滑りが生じた。実験結果より，速度を20cm/sec程度に制限する必要があると結論付けた。床に落ちたりモコンを拾い上げる実験もマンピュレータの機構上，問題なく達成が可能であることを確認した。また消費電力は，駆動時最大22W程度，待機時は7W程度であった。0号機に対して増加した原因は，DC/DCコンバータとレギュレータにより24V電源を12Vと5Vに降圧した際のエネルギー損失と，支柱内のカウンタウエイト

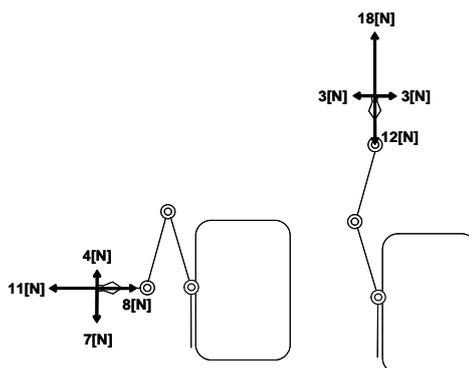


図14 水平面での作用力測定結果

を軽量化のため取り除いたことが原因と考えられる。

今後は，対象ユーザーによる実証試験を行い，操作性向上を目指した機構の改良を進める予定である。

5. まとめ

今回，操作検証用として，電動車いすに搭載可能であり，軽量コンパクトで，特にコスト面で実現性のあるマンピュレータを設計・試作した。結果，目標仕様および目標価格をほぼ達成できたといえる。電動車いすと合わせた動作試験の結果については，報告「身体障害者のQOL（生活の質）を大幅に向上させる高機能電動車いすの研究開発 - 基本設計と試作 -」⁶⁾を参照にされたい。

謝 辞

本研究の遂行にあたり，共にご検討下さいました早稲田大学ならびに(株)今仙技術研究所の関係者皆様に深く感謝します。また，有効なご助言を多く下さいましたNPO法人バーチャルメディア工房さぶ上村数洋理事長ならびに岐阜県福祉事業団の関係者皆様に深く感謝します。

文 献

- [1] 経済産業省,平成18年4月策定
- [2] <http://www.AAI.jp>
- [3] <http://www.exactdynamics.nl/nihongo/index.html>
- [4] <http://www.appliedresource.com/RTD/rtindex.html>
- [5] 今井智彦, 千原健司, 稲葉昭夫, 久富茂樹, 飯田佳弘, “県内福祉施設で使用可能な支援機器の調査”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告 第7号, pp.47-50, 2006.
- [6] 稲葉昭夫, 千原健司, 藤井勝敏, 棚橋英樹, “身体障害者のQOL（生活の質）を大幅に向上させる高機能電動車いすの研究開発 - 基本設計と試作 -”, 岐阜県生産情報研究所研究報告 第8号, pp.48-50, 2007.