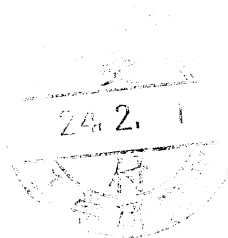


平成 23 年度 修士学位論文

姿勢に基づく人間の物体持ち上げ動作特性解析



指導教官 池浦良淳 教授

三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻
システム設計研究室
410M123 玉置翔士

目次

第1章 序論	3
1.1 研究背景	3
1.2 本研究の目的	5
1.3 本論文の構成	6
第2章 実験装置	7
2.1 実験システム	7
2.1.1 運搬物体	8
2.1.2 計測装置及び計測箇所	8
2.1.3 被験者	11
2.1.4 評価項目	12
第3章 人の持ち上げ作業	16
3.1 回数が人の持ち上げ作業特性に与える影響	16
3.1.1 実験目的	16
3.1.2 実験方法	16
3.1.3 運搬物体の運動の変化	17
3.1.4 物体の軌跡の標準偏差	19
3.1.5 姿勢と関節角度の関係	22
3.2 人の持ち上げ作業運搬条件が人の持ち上げ作業特性に与える影響	25
3.2.1 実験の目的	25
3.2.2 実験環境	25
3.2.3 開始位置による運搬物体運搬軌道の変化	27

3.2.4	開始位置による運搬物体速度・角速度の変化	31
3.2.5	開始位置による各関節角度の変化	35
3.2.6	開始位置による人体の姿勢の変化	39
3.2.7	開始位置による最大関節速度の変化	40
第4章 可操作性での評価		41
4.1	可操作性	41
4.2	運搬姿勢を用いた可操作楕円体の計算	43
4.3	運搬姿勢を可操作楕円体での評価	45
4.3.1	可操作楕円体	45
4.3.2	各関節速度を考慮した可操作楕円体	50
第5章 結論		55
5.1	本研究のまとめ	55
5.2	今後の課題	56
参考文献		57
謝辞		59

第1章

序論

1.1 研究背景

現在、日本では少子高齢化が諸外国に例を見ない早さで進んでいる。Fig.1.1 は日本の主な労働力と考えられる15歳～64歳の生産年齢人口と総人口の推移を示している^[1]。生産年齢人口が1990年から2000年の間にピークを迎え、その後、年々減少傾向にある。このことから今後さらに労働者の減少が見込まれていることがわかる。また、生産工場では消費者の多様な要求に応えるための多品種少量生産や生産効率の向上のためのセル生産方式の採用が増加している。このような工場では複雑な作業を必要とし、生産変動に柔軟に対応しにくい自動化工程は採用されにくく、作業の組み換え自由度が高く、生産変動に柔軟に対応できる労働者中心の組み立て工程は重要になってきている。労働者にとって、重量物の運搬は特に大きな肉体的負担となっており、これまで以上の作業負担の低減が求められている。このような作業環境を改善する方法として、人の作業を補助するパワーアシストがある。

この装置は、人が加えた力を増幅するものであり、重量物を運ぶ作業者を補助し、負担の軽減、作業時間の短縮をするのに有用である。近年、このパワーアシスト装置の研究は盛んに行われている^{[2] [3]}。Fig.1.2に示すようなKazerooniらが提案したExtender^[4]をはじめとし、最近では使用者の体に直接装着して動作の補助を行う外骨格型のパワーアシストシステムも開発されている^{[5]-[6]}。その一つであるロボットスーツHAL^[7]をFig.1.3に示す。パワーアシスト装置は、人間と装置が接触した状態で作業を行うために、高速度や高精度が求められるような作業用ロボットとは異なり、人間に対して脅威、違和感を与えない動作の生成が必要となってくる。このような人間との協調を考慮したロボットの制御

の研究は既にいくつも行われている^{[8]-[9]}.

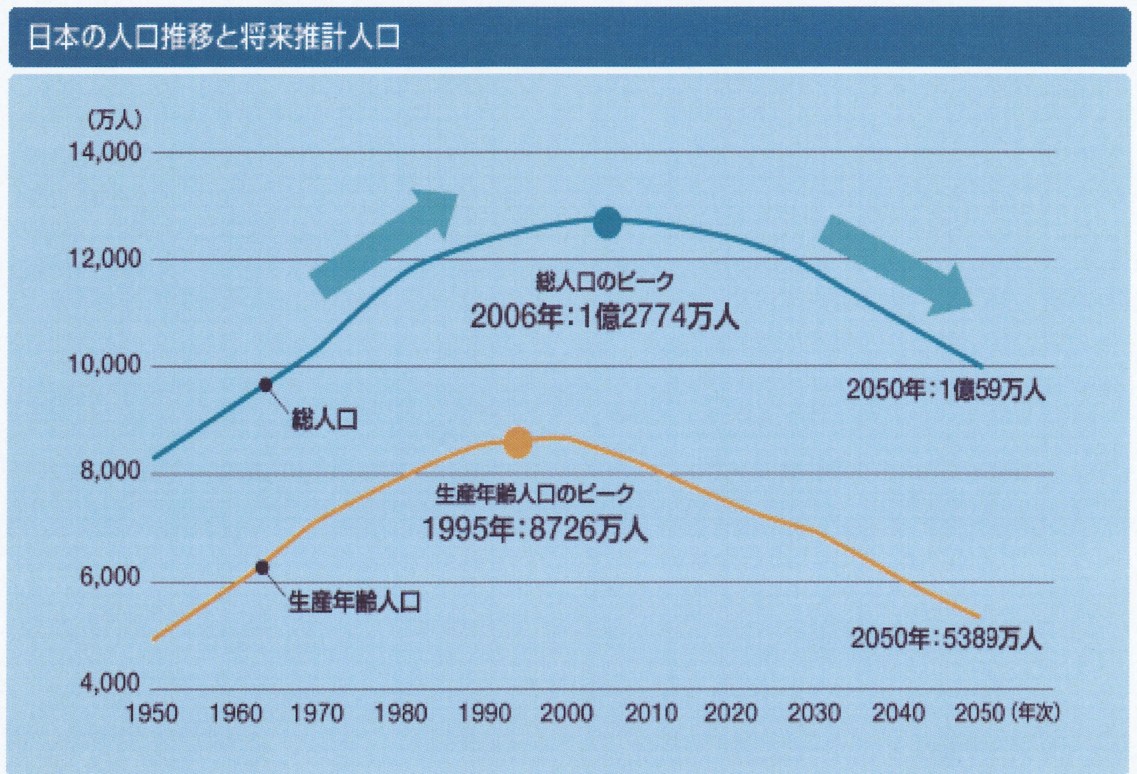


Fig.1.1 生産年齢人口の推移^[1]

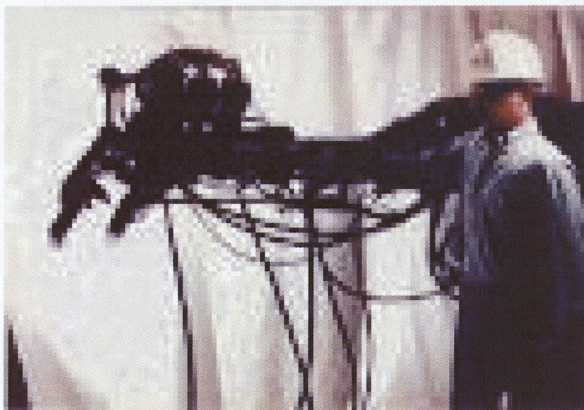


Fig.1.2 Extender

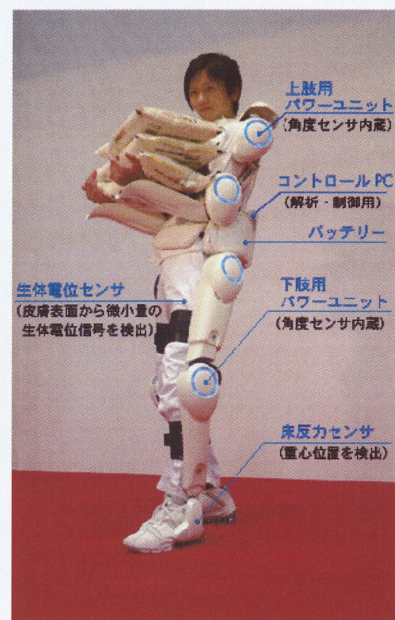


Fig.1.3 ロボットスーツ HAL

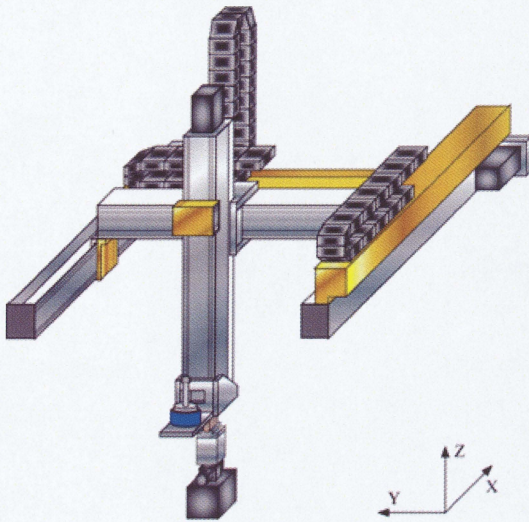


Fig.1.4 池浦らの開発した装置

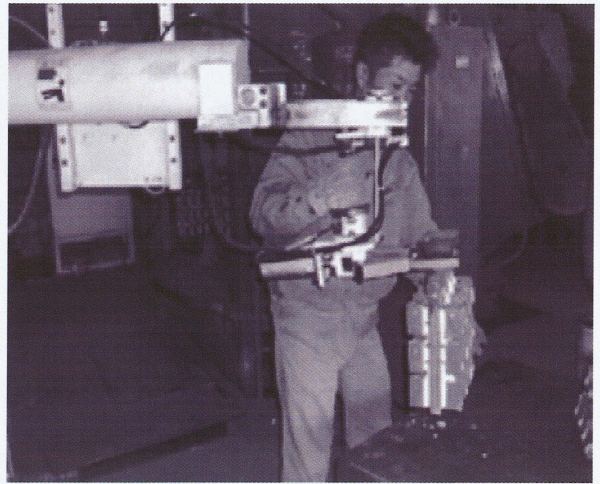


Fig1.5 パワーアシストによる鋳物ハンドリング

また、一方で生産現場の利用を前提としたパワーアシストシステムの研究はFig.1.4に示されるような池浦ら^{[10][11]}、山田ら^[12]、田川ら^[13]、Fig.1.5に示されるような寺嶋らなどがある。ここでは、特に組み立て作業を伴う生産ラインなどで用いることのできるパワーアシストシステムを産業用パワーアシスト装置と呼ぶこととする。

1.2 研究目的

これまでのパワーアシストシステムの研究では、人の腕の操作力に基づいた制御手法について検討されている。しかし、装置を操作する作業者の作業姿勢まで考慮された運搬動作解析が行われておらず、その動作がどのような特徴を持つのか未だ明らかにはされていない。例えば、作業者が物体を運搬する際、腕だけでなく、体全体を用いて物体を運搬する。作業者の姿勢から次の動作を推測できるならば、作業者への負担を少なくアシストできるようになる。そこで本研究では、パワーアシストシステムの操作性を向上させる運動モデル構築のために、作業者の運搬時の各関節の動きと運搬物体の運動を解析し、作業者の運搬動作の姿勢から手先の動きを推定し、作業者の次の動作をアシストする手法を考察する事を目的としている。また物体運搬作業には様々な例が挙げられる^{[15][16]}。自由度の高い作業は解析が非常に困難であるために、本研究では、Fig1.6に示すようなX-Y平面での並進2自由度と回転1自由度を含むタイヤの運搬作業を対象とする人の自然な持

ち上げ動作の解析を行う。

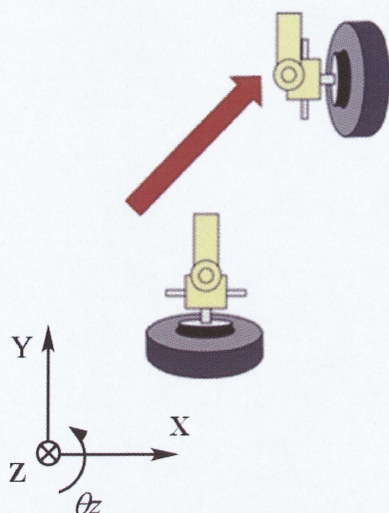


Fig1.6 タイヤの運搬作業

1.3 本論文の構成

第 2 章では、実験装置と評価項目について述べる。第 3 章では、人の持ち上げ作業について述べる。この章の前半は搬物体に回転と並進運動を伴う人の自然な持ち上げ作業の個人差および習熟する日数と習熟する事により、人の持ち上げ作業特性に与える影響について述べる。後半は作業運搬条件が人の持ち上げ作業特性に与える影響について述べる。第 4 章では習熟した運搬動作の姿勢を用いて、人の運搬動作を推定していく指標の一つである可操作性で評価する。最後に第 5 章では本研究のまとめと今後の課題について述べる。

第2章

実験装置

2.1 実験システム

本実験で用いるシステムは、運搬物体、運搬物体と人の姿勢を計測する3次元位置計測装置、データ記録用のコンピュータで構成される。Fig.2.1 に実験システムの構成を示す。

被験者の主要関節、運搬物体に位置計測用のマーカを取り付けた状態で、壁にあるターゲット内まで運搬物体を持ち上げる。被験者側面から3次元計測装置で撮影する事により、運搬物体の運動、被験者の大勢の測定を行う。以降、実験システムの詳細について記述する。

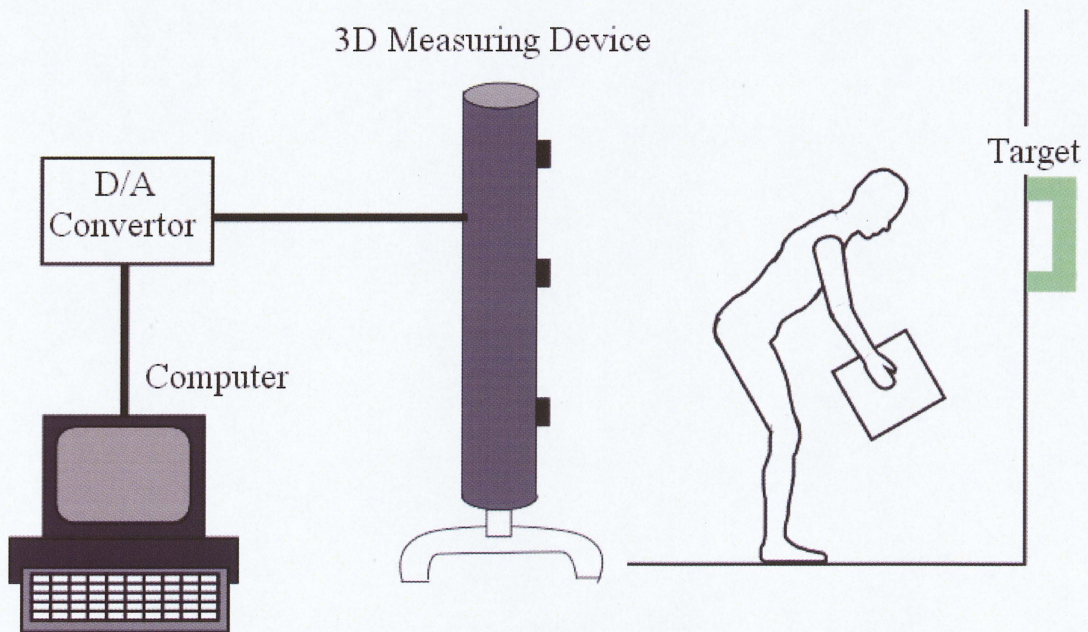


Fig.2.1 実験装置

2.1.1 運搬物体

主にパワーアシストシステムで物体を運搬する際の仮想質量は1kg以下で行われている。よって、運搬物体の重さは0.61kgである。運搬を行う物体は験者が運搬する物体の形状は幅 $l_1=31\text{cm}$ 、奥行き $l_2=41\text{cm}$ 、高さ $l_3=21\text{cm}$ である。

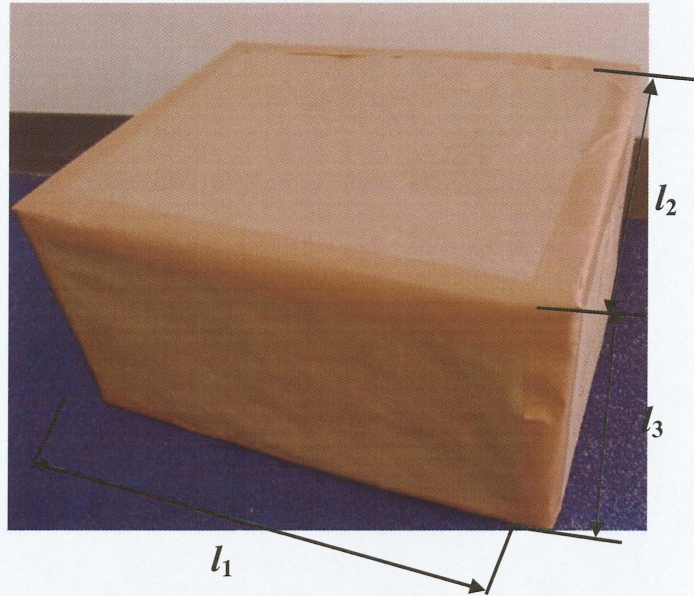


Fig.2.2 運搬物体

2.1.2 計測装置及び計測箇所

計測はNDI社製の光学式三次元動作解析装置(モーションキャプチャ)「OPTOTRAK CERTUS」を用いて行った。OPTOTRAK CERTUSは赤外線を発行するマーカを付けた状態で動作を行い、赤外線発光マーカ(Fig.2.3)から発光された赤外線を3個の赤外線受光カメラ(Fig.2.4)で受光し、各カメラの情報より三角法を用いて各マーカの位置計測を行う。OPTOTRAK CERTUSの諸元をTable 2.1に、計測領域をFig.2.5に示す。X軸、Y軸、Z軸はFig.2.7のようにとり、Z軸周りにおける物体の回転角度を $\theta [^\circ]$ とする。サンプリングタイムは100Hzである。3次元計測装置のカメラの設置位置は、被験者の右側方向に被験者から3.5mの距離に設置した。また3つのカメラの位置は床に対して垂直に設置した。

次にポジションマーカの設置方法について述べる. Fig.2.6 のように, 運搬物体の並進方向の運動, 回転角度を計測するために, 運搬物体に 2 つのポジションマーカを取り付けた. 取り付け位置は物体側面の上遇, 下遇に対角線上になるように設置した. また, 被験者の運搬時の姿勢, 各関節の角度を測定するため被験者の手首, 肘, 肩, 腰, 膝, 足首の計 6 箇所へ, 各関節の回転中心にポジションマーカを取り付けた.



Fig.2.3 赤外線発光マーカ(IRLED)



Fig.2.4 赤外線受光センサ
三重大学大学院 工学研究科

Table 2.1 OPTOTRAK CERTUS の仕様

Maximum Number of Markers	512
Maximum Sampling Rates (Marker Frequency)	4600 Hz
Maximum Frame Rate N=number of markers	$4600/(N+2)\text{Hz}$
Accuracy	0.1mm
Resolution	0.01mm

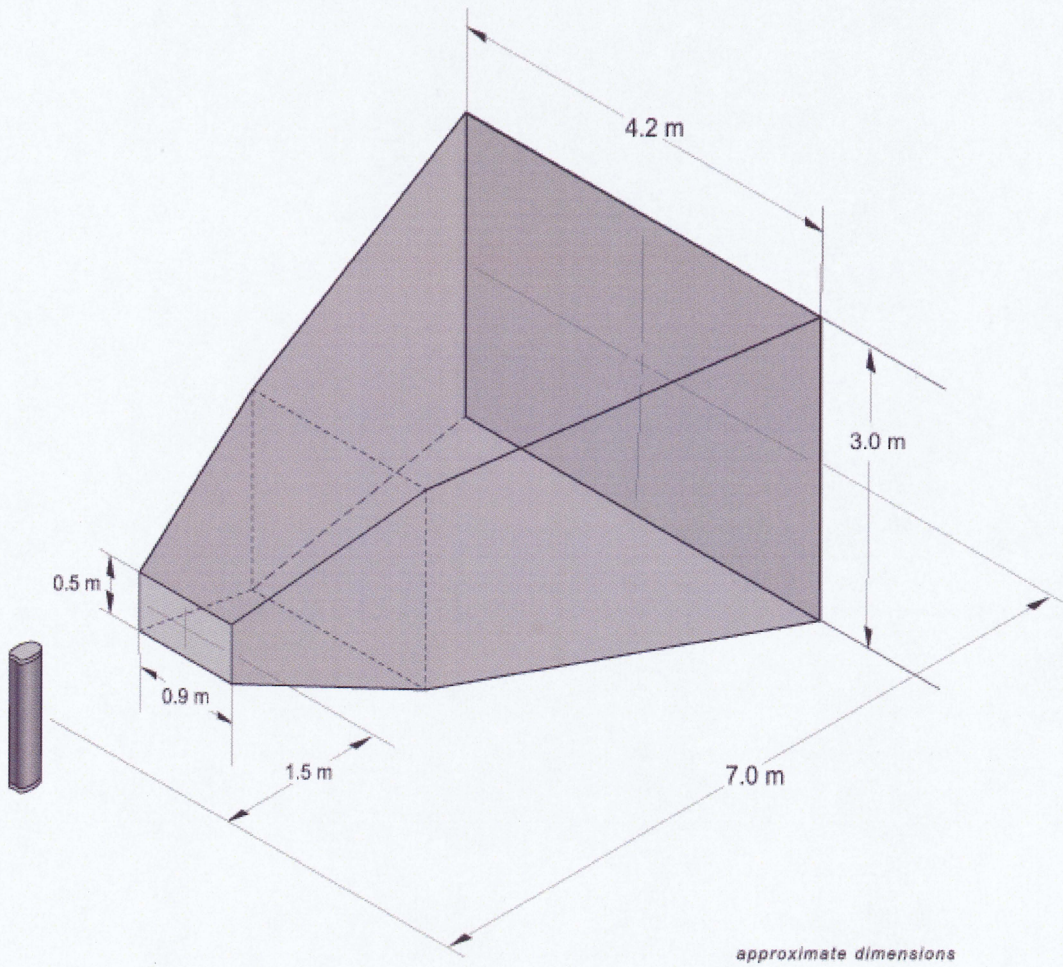


Fig.2.5 計測領域

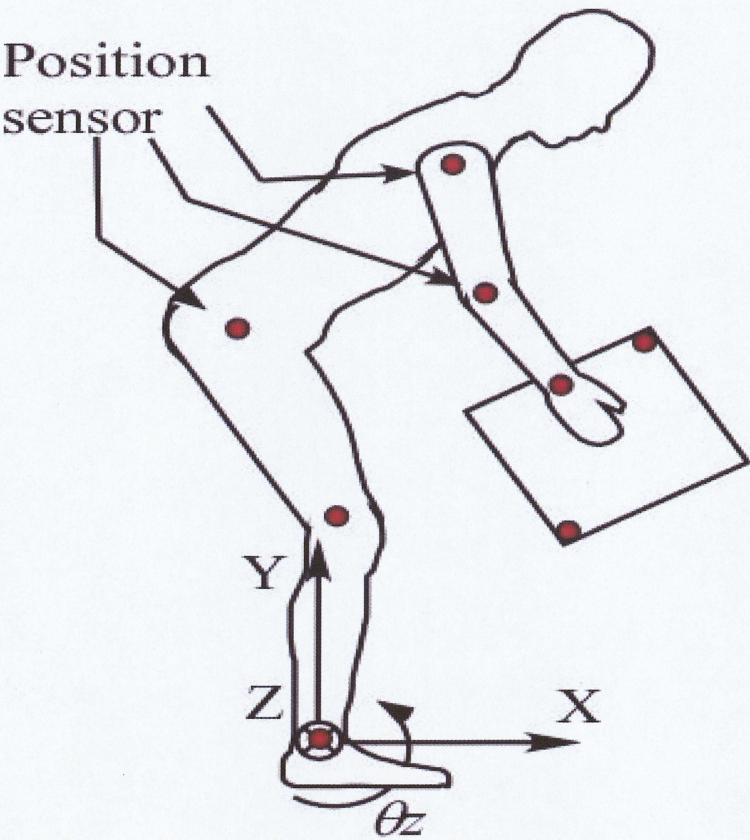


Fig.2.6 ポジションマーカの配置

2.1.3 被験者

被験者の年齢は 24 歳が 2 名, 22 歳が 2 名の健常な男子 4 名である. 各々の年齢, 身長, 体重, 実験経験回数を Table2.2 に示す.

Table2.2 被験者

被験者	年齢	身長[cm]	体重[kg]	実験回数[回]
A	23	178	67	200
B	23	170	55	1000
C	21	174	66	未経験
D	21	168	62	未経験

2.1.4 評価項目

本実験で評価する値は物体の重心位置の変化，被験者の姿勢の変化，被験者の姿勢を基にした可操作性である．これらの評価値を以下の方法で算出する．

① 物体の重心位置

運搬物体の重心は側面から見て中心になるようにしている．よって重心位置は，物体に取り付けられた 2 か所のポジションマーカ $A_i(x_{ai}, y_{ai})$ と $B_i(x_{bi}, y_{bi})$ の座標より，式(2.1)で中心の座標 $C_i(x_{gi}, y_{gi})$ を求め物体の重心位置とする．

$$C_i(x_{gi}, y_{gi}) = \left(\frac{x_{ai} + x_{bi}}{2}, \frac{y_{ai} + y_{bi}}{2} \right) \tag{2.1}$$

Fig.2.7 に運搬物体のマーカを示す．位置座標は 3 次元で得られるが本実験では Z 軸方向の変位は僅かなものであるため，動作を 2 次元とみなす．ここで， i は計測したデータ番号である．

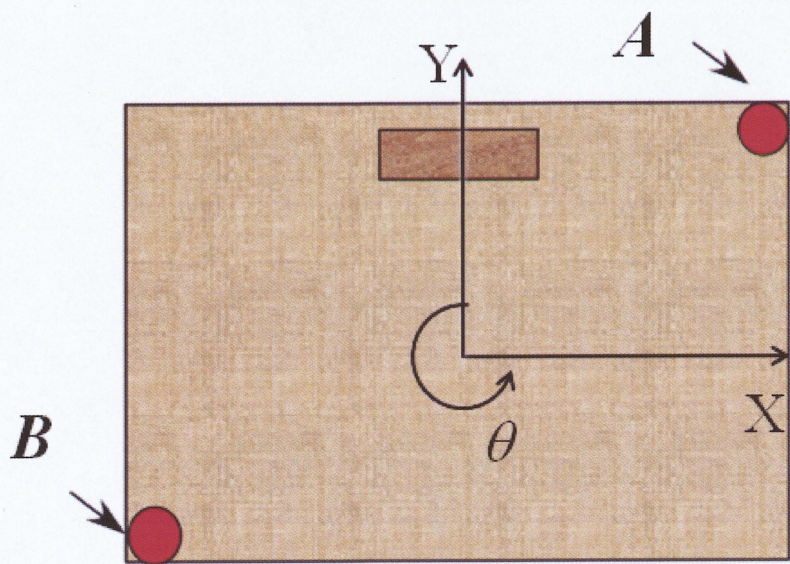


Fig.2.7 運搬物体のマーカ

② 物体の回転角度

運搬物体に取り付けたマーカ A と B のなす各投影角 α_i , β_i , γ_i は, それぞれのマーカの位置ベクトル $A_i = [x_{ai} y_{ai} z_{ai}]^T$, $B_i = [x_{bi} y_{bi} z_{bi}]^T$ を用いて式(2.2), (2.4)で表わされる.

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right) \quad (2.2)$$

$$\beta_i = \tan^{-1} \left(\frac{z_{i+1} - z_i}{y_{i+1} - y_i} \right) \quad (2.3)$$

$$\gamma_i = \tan^{-1} \left(\frac{x_{i+1} - x_i}{y_{i+1} - y_i} \right) \quad (2.4)$$

運搬物体の回転角度は Z 軸周りの回転のみで表現されるため, 求める角度を $\theta_i [^\circ]$ とすると式(2.4)より式(2.5)のように求めまる.

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{x_{ai} - x_{bi}}{y_{ai} - y_{bi}} \right) \quad (2.5)$$

これにより物体の回転角度を求める.

③ 物体速度

① で求めた重心の座標の時間微分を行い算出する.

④ 標準偏差

標準偏差は統計値や確率変数の散らばり具合を表わす数値の一つである. 標準偏差が小さいという事は全体のばらつきが小さいという事である. ここでは, 作業者の習熟度を見るために, 運搬物体の軌跡 X 方向と Y 方向の標準偏差で判断した. 標準偏差は式(2.4)に示す. データを $a_1, a_2 \dots a_i$, データ数を i , 平均値を m , 標準偏差を σ とする.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(a_1 - m)^2 + (a_2 - m)^2 + (a_i - m)^2}{i - 1}} \quad (2.6)$$

⑤ 被験者の姿勢

前節で述べた、被験者に装着した各マーカから得られた座標より被験者の姿勢を算出する。

⑥ 被験者の各関節角度

被験者の各関節の駆動部に装着したマーカは、物体の重心を C, 手首を D, 肘を E, 肩を F, 腰を G, 膝を H, 足首を I とする。マーカ I と H のなす角度を θ_1 , マーカ H と G のなす角度を θ_2 , マーカ G と F のなす角度を θ_3 , マーカ F と E のなす角度を θ_4 , マーカ E と D のなす角度を θ_5 , マーカ D と C のなす角度を θ_6 とし, Fig2.8 に示す。それぞれの角度は式(2.7)～(2.12)によって表わされる。各関節の角度は時計回りを+とする。

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left[\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \right] \quad (2.7)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left[\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} \right] \quad (2.8)$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left[\frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3} \right] \quad (2.9)$$

$$\theta_4 = \tan^{-1} \left[\frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{y_5 - y_4}{x_5 - x_4} \right] \quad (2.10)$$

$$\theta_5 = \tan^{-1} \left[\frac{y_5 - y_4}{x_5 - x_4} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{y_6 - y_5}{x_6 - x_5} \right] \quad (2.11)$$

$$\theta_6 = \tan^{-1} \left[\frac{y_6 - y_5}{x_6 - x_5} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{y_7 - y_6}{x_7 - x_6} \right] \quad (2.12)$$

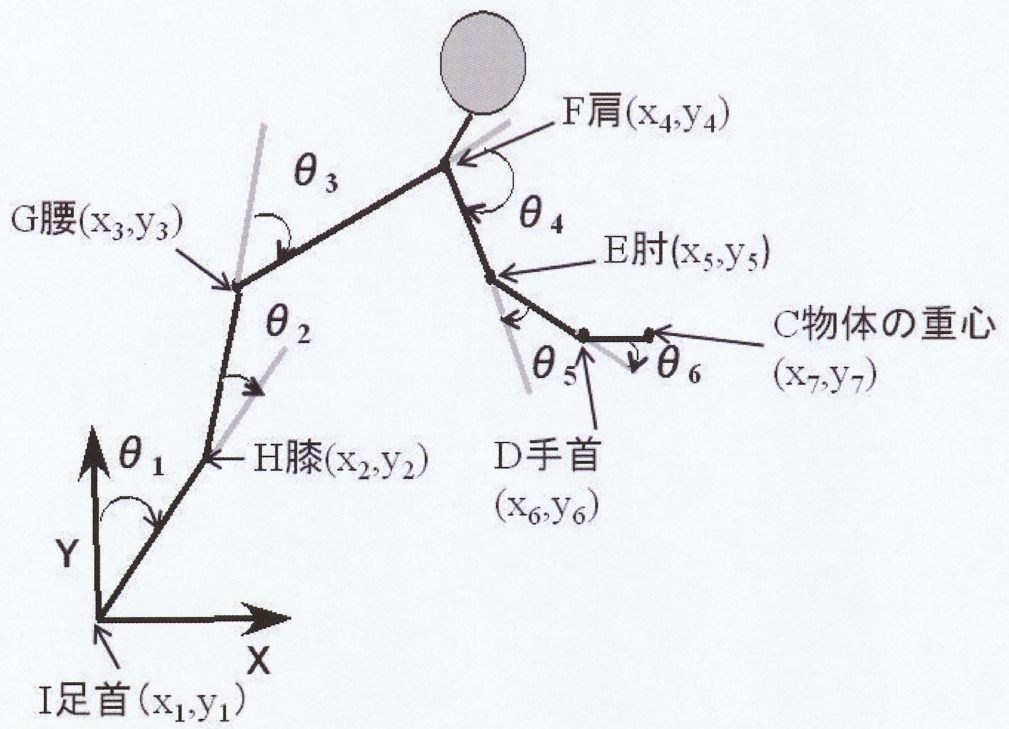


Fig.2.8 人体の各関節の詳細

第3章

人の持ち上げ作業

人の持ち上げ作業の計測のために、持ち上げ作業に対する条件の指定を定め、外部環境の影響を受けない場合の人間の持ち上げ動作について実験を行った。

3.1 回数が人の持ち上げ作業特性に与える影響

3.1.1 実験目的

この実験では作業者が習熟する回数の特定を目的とする。作業現場で作業を行う場合、作業者は作業に慣れており習熟している。このため、持ち上げ作業を行う被験者も習熟している方が望ましい。そこで、被験者は1日40回の試行を5日間毎日継続して行う。

3.1.2 実験方法

実験環境の概要をFig.3.1に示す。被験者が運搬する物体は2.1.1項で述べてある。運搬物体の設置位置は被験者のつま先に合わせた床から40cm上に設置してある。運搬の目標位置は被験者の前方にある壁に運搬物体の底面の各辺に10cmずつ加え横41cm、縦51cmの長方形とした。動作計測のために被験者と運搬物体に取り付けたマーカの位置は2.1.2で述べてある。3次元運動計測装置のサンプリング周波数は100Hzである。計測動作は運搬物体の回転を伴う鉛直持ち上げ作業を想定する。被験者は足の位置を固定した直立の状態から開始の合図を受けて、床に設置した物体を両手で掴み、床から被験者の正面にある壁の目標位置まで90度回転させながら持ち上げ、目標位置の枠内に入るように物体を保持する動作を行うように指示した。開始位置から目標位置までの間に障害物はない。被験者は4名の健常な男子大学生とした。計測は3秒間とし、被験者は練習を3回行った後、1日に40回の試行をし、各試行は30秒間隔で行った。これを5日間毎日継続して行った。

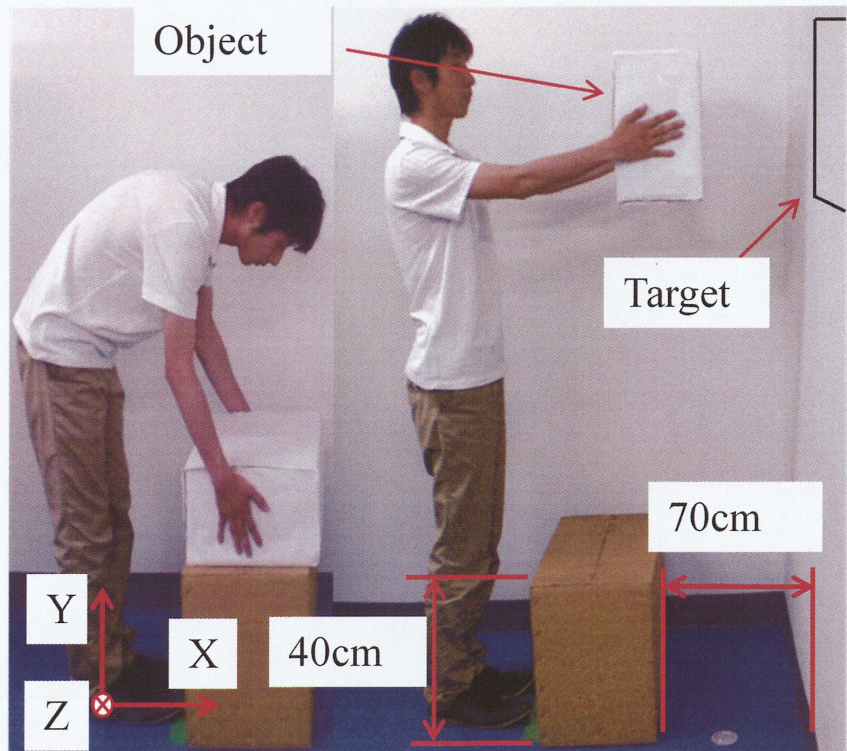


Fig3.1 実験環境

3.1.3 運搬物体の運動の変化

Fig.3.2は物体の重心点の軌跡，接線速度，角速度で40回の平均値である。Fig.3.2(a)，(d)は運搬物体の重心の軌跡を示したものである。縦軸はY方向の変位，横軸にはX方向の変位を示している。被験者C，Dの軌跡は目標地点に向けて一直線に向かっているのに対して，被験者A，Bの物体の軌跡は一旦上に上げた後，目標地点へ近づける軌跡を取った。Fig.3.2(b)，(e)は運搬物体の重心の軌跡に沿った接線速度を示したものである。縦軸は接線速度，横軸は作業時間を示している。被験者A，Cの速度は1日目に比べ5日目の速度は約0.2%増加した。被験者B，Dの速度は変化がなかった。Fig.3.2(c)，(f)は運搬物体の重心周りの物体の角速度を示したものである。縦軸は回転速度，横軸は作業時間を示している。1日目と5日目を比較すると5名の被験者ともに速度は増加した。

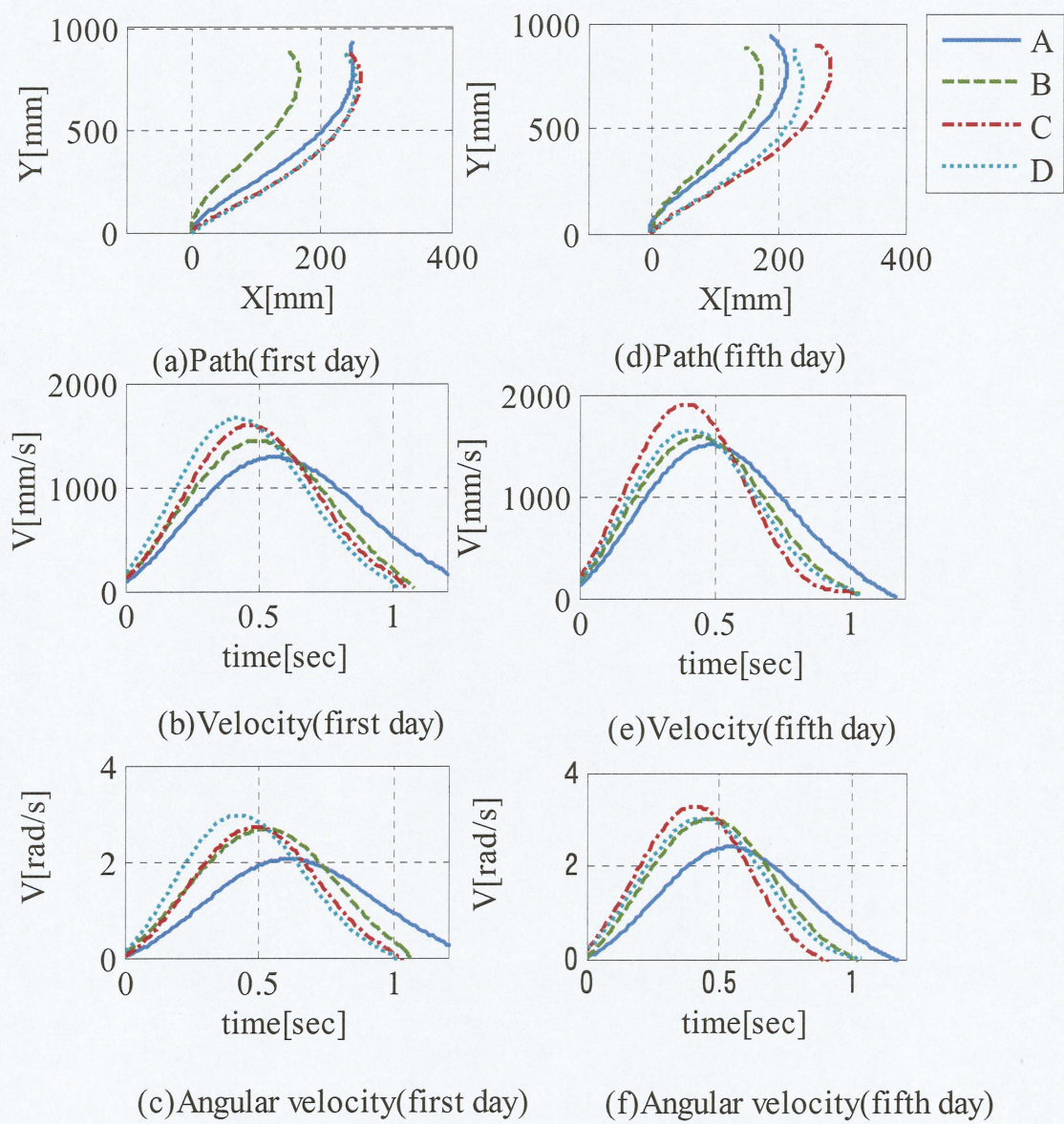


Fig3.2 運搬物体の運動

3. 1. 4 物体の軌跡の標準偏差

Fig3.3, Fig3.4, Fig3.5, Fig3.6 に各被験者 A, B, C, D の物体の重心軌跡の標準偏差の図を示す. この図は 1 日毎の標準偏差を表わしており, 各図の(a)は縦軸に X 方向の標準偏差の変位, (b)は縦軸に Y 方向の標準偏差の変位, 横軸に時間の変位を示している. 被験者 A は 2 日目と 3 日目の波形が同じで 4 日目, 5 日目と同じ波形になった. ばらつく位置が変化したが, 0.6 秒の時を見ると, ばらつきは減少傾向にある. 被験者 B は日を重ねるごとにばらつきが減少傾向にあり, 3 日目以降のばらつきは少ない値で安定した. 被験者 C も日を重ねるごとにばらつきが減少傾向にあり, 4 日目以降のばらつきは少ない値で安定した. 被験者 D は 3 日目のばらつきは大きい, 4 日目以降のばらつきは少ない値で安定した.

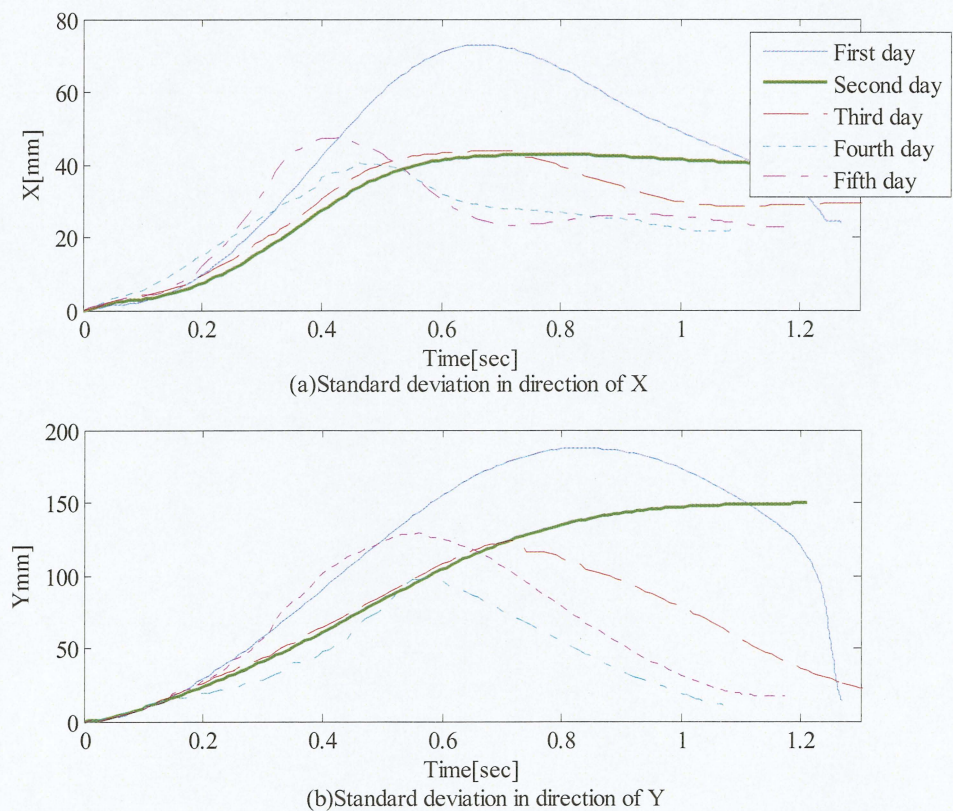
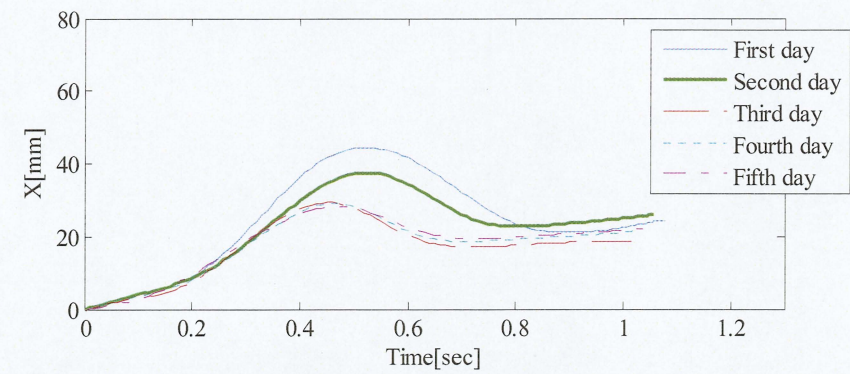
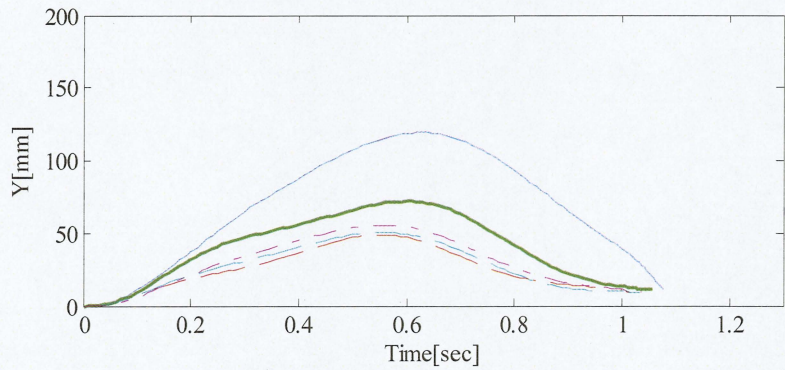


Fig3.3 運搬軌道の標準偏差 (被験者A)

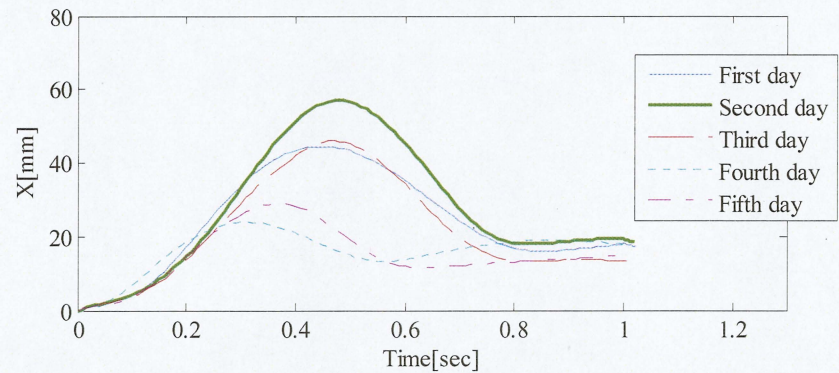


(a)Standard deviation in direction of X

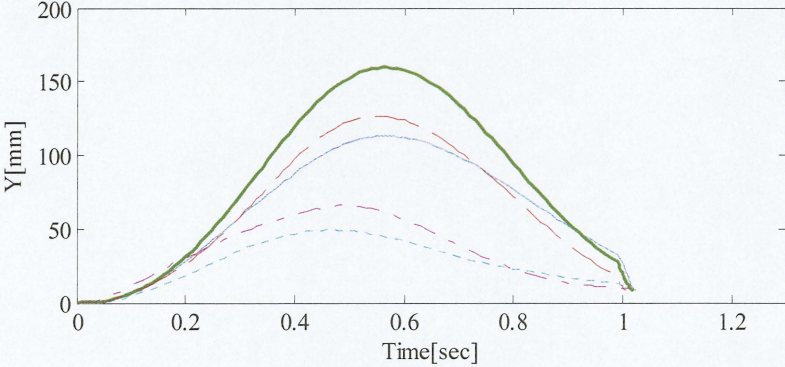


(b)Standard deviation in direction of Y

Fig.3.4 運搬軌道の標準偏差 (被験者B)



(a)Standard deviation in direction of X



(b)Standard deviation in direction of Y

Fig3.5 運搬軌道の標準偏差 (被験者C)

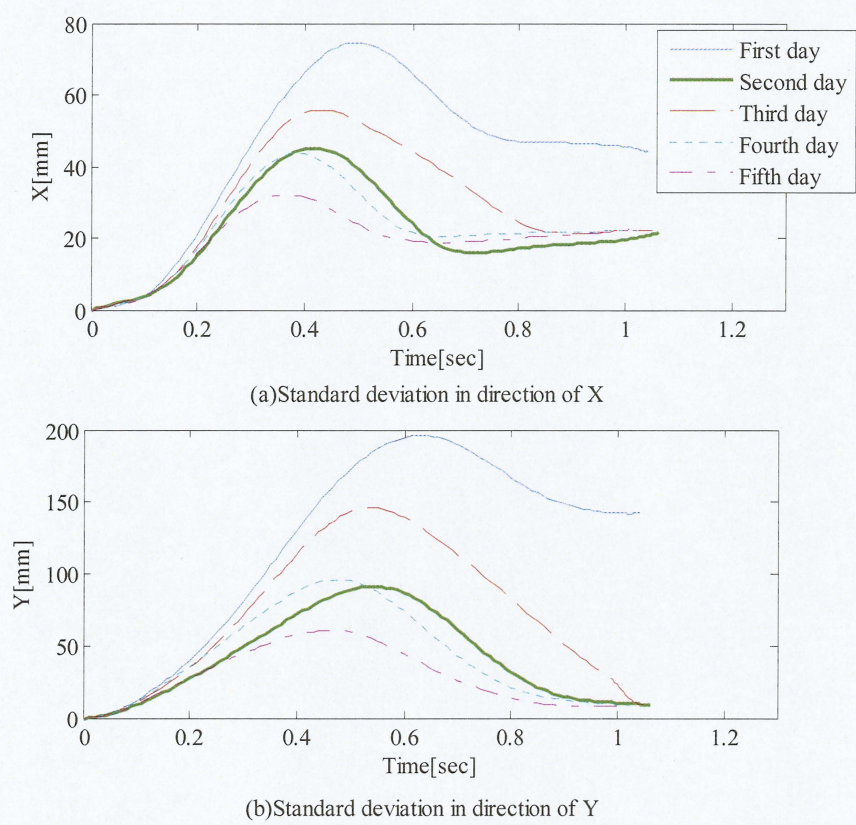


Fig3.6 運搬軌道の標準偏差 (被験者D)

3. 1. 5 姿勢と関節角度の関係

関節角度と人の姿勢の変位の図を Fig.3.7, Fig3.8 に示す. この図は人の姿勢と関節角度のばらつきが収束した 5 日目の 30 回目から 40 回目の間から抜粋したデータである. また, 運搬運動終了時に物体を静止することが困難なため, 作業終了時間は運搬物体の接線速度と角速度が共に最大値の 5%未満になった時間と定めた. Fig.3.7 は物体を掴んでから目標地点で保持するまでの各関節の変位を示している. 物体持ち始めの角度をゼロとし, そこからの角度変位の増減を示す. 足首の角度変位を θ_1 , 膝の角度変位を θ_2 , 腰の角度変位を θ_3 , 肩の角度変位を θ_4 , 肘の角度変位を θ_5 , 手首の角度変位を θ_6 で示す. 縦軸に角度変位, 横軸に作業時間である. $\theta_1 \sim \theta_3$ までは 4 名とも差異がなく, $\theta_4 \sim \theta_6$ では被験者 C, D は角度変位も波形も同一であったが, 残りの 2 名は波形も変位も異なっていた. Fig3.8 は物体を掴んでから目標地点で保持するまでの 0.1 秒毎の姿勢の移り変わりの図である. 接線速度と角加速度が一番高い姿勢を四角のマーカーで示す. 接線速度と角加速度は同じ姿勢の時に最大値になり, 最大値になる物体の重心の位置は X 座標が 500~570 の間, Y 座標は 730~850 の間の時である. 持ち始めの姿勢は被験者 B だけが膝を曲げた状態から物体を運搬した.

被験者 4 名を姿勢と各関節角度から比較すると, 物体の軌道が被験者 C, D が一直線上に目標地点に向かっているのに対して, 被験者 A, B は物体を一旦上に持ち上げて, 目標地点に向かっている. これは, θ_5 より肘の使い方で 0.2 秒までの運搬軌道が異なっただと考える. また, 被験者 C, D は物体を持ち始めから手首以外の関節を用いて物体を運送し, 物体が持ち上げ目標地点に近づくにつれ手首も用いて微調整を行う. 被験者 A は肘と手首をあまり持ちいらずに目標地点に物体に近づける. 被験者 B は各関節全てを用いて目標地点に物体を近づける.

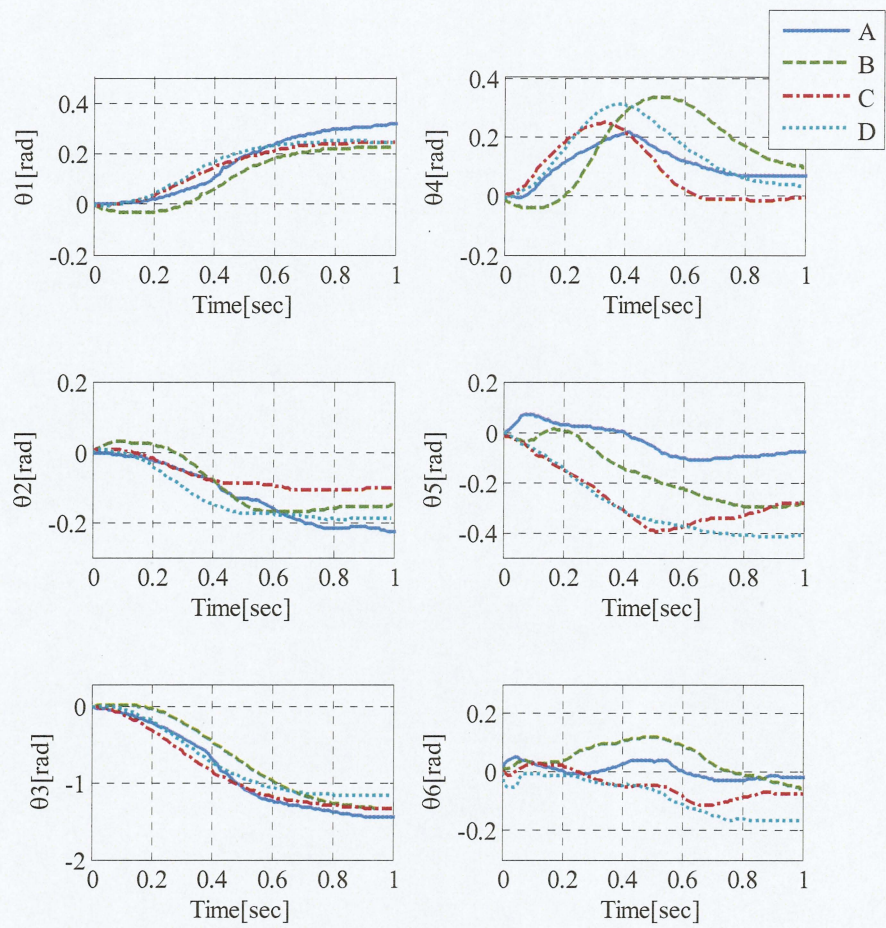


Fig3.7 各関節角度の変位

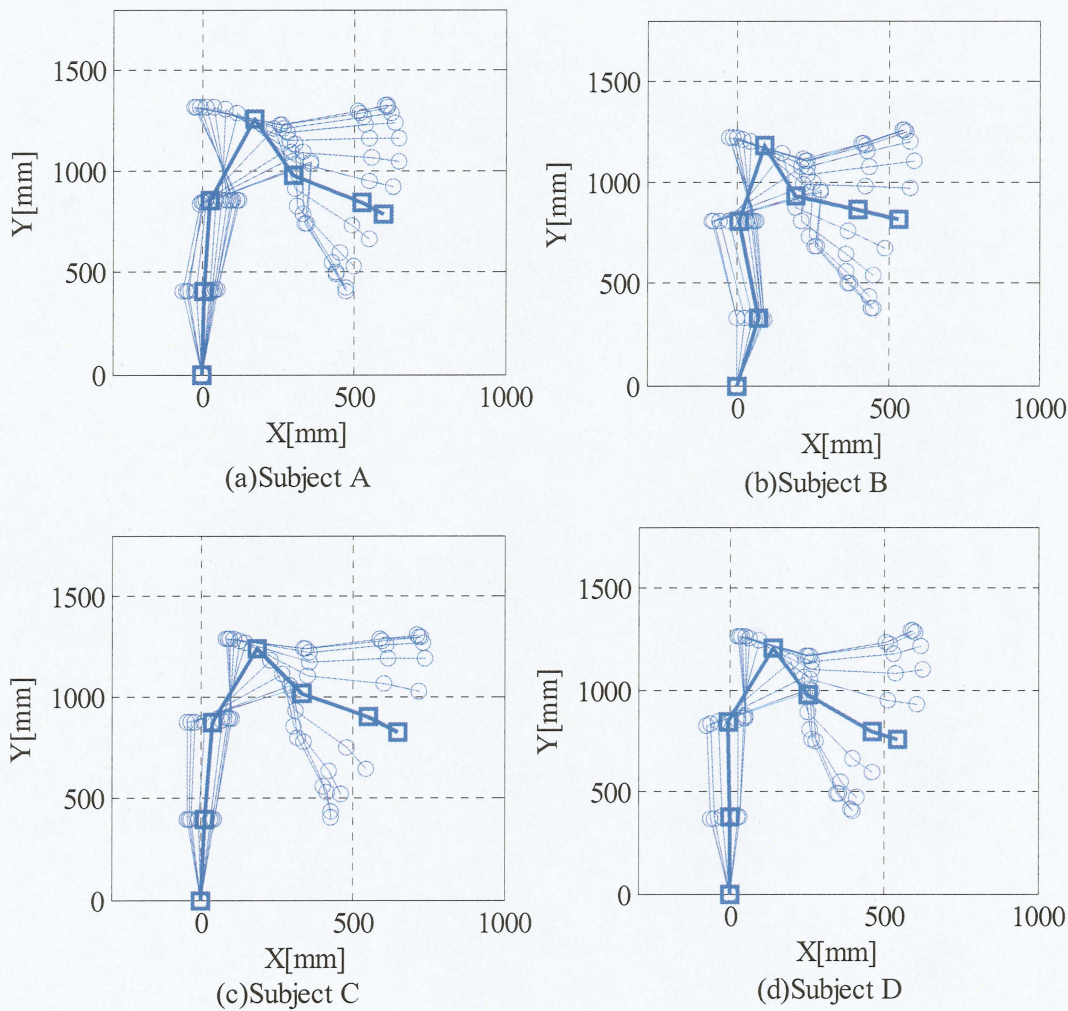


Fig.3.8 0.1 秒毎の姿勢

3.2 人の持ち上げ作業運搬条件が人の持ち上げ作業特性に与える影響

3.2.1 実験の目的

物体を 90° 回転させて運搬する際の手先の運動モデルを作成するにあたり、物体を運搬する際の始点が変わっても、運搬動作に共通な要素があるかを検証する。そのために開始位置が変化したことによる物体の運動の変化や、人体の姿勢と運動の変化を検証する。

3.2.2 実験環境

①実験方法

運搬する際の開始位置の変化による与える影響を見るため、計 3 種類の開始位置から物体を運搬し測定を行う。測定する値は運搬物体の重心位置の変化、運搬物体の回転角速度、運搬物体の接線速度、および被験者の姿勢の変化、人体の各関節角度である。これらの値を計 3 種類の位置において 1 日各位置において 40 回行い、継続して 5 日間、合計 600 回計測を行う。その際の動作時間は 3 秒、サンプリングタイムは 0.01 秒である。1 日 3 種類の位置で実験を行うので被験者の疲労が実験に影響しないように、1 つの位置が終了してから 1 時間の休憩をしてから違う位置での実験を行う。運搬物体の開始位置は地面から 40cm の高さ、突起物からの距離 3 種類である。被験者には開始位置にある物体を開始の合図とともに被験者の肩の高さ程度の高さにある目標地点に運搬物体が収まるように運搬する。

②突起物

開始位置を 3 種類設けることに伴い、壁に接近しすぎた開始位置では壁からの圧迫感を受けてしまう。その壁からの圧迫感を受けずに運搬作業を行う必要があるため、壁に箱状の突起物を取付け、壁から 20cm の突出しを設ける。その突出しを目標地点として実験を行う。

③種類の計測位置

人により腕の長さが違うので、突起物からの3種類の距離すべてを被験者4人で統一すると、被験者によって突起物までの距離の感じ方が統一されない。その問題を避けるために突起物からの距離を百分率で3種類に分けて実験を行う。割合の定義の仕方は、直立した状態で、腕を完全に伸ばして指先を突起物に付けたときの突起物から足先までの距離を100%と定義し、物体を違和感なく持ち上げることができる最短の距離80%、その間の90%の3箇所において計測を行う。

④ 被験者それぞれの計測位置

Table.3.1 に実際の被験者ごとの突起物から足先までの3種類の計測位置を示す。

Table.3.1 被験者ごとの計測位置

	Position		
Subject	80%	90%	100%
A	48cm	54cm	60cm
B	45cm	49cm	54cm
C	41cm	46cm	51cm
D	48cm	54cm	60cm

⑤パターンテーブル

1日ごとに3種類の位置で実験を行う。例えば毎日同じように80%、90%、100%の位置の順番で実験を行うことにより、80%の位置での運搬動作の傾向が90%、100%の位置で表れる可能性が考えられるので、Table.3.2のように日にちごとに異なる位置パターンを設け、位置の順番の影響が表れないようにする。また被験者ごとにも位置パターンを変えることにより、位置の順番効果の影響がないことの裏付けの要素として、パターンを変える。

Table.3.2 被験者ごとの計測パターン

Subject	Dates				
	1st	2nd	3rd	4th	5th
A	80→90→100	90→80→100	90→100→80	100→80→90	100→90→80
B	100→90→80	100→80→90	90→100→80	90→80→100	80→90→100
C	90→80→100	80→100→90	100→90→80	90→100→80	80→90→100
D	90→100→80	100→80→90	80→90→100	100→90→80	90→80→100

3.2.3 開始位置による運搬物体運搬軌道の変化

運搬物体の運搬軌道の開始位置による変化をみるため、運搬物体の重心位置の軌道に着目する。重心の軌道は被験者により異なり、開始位置によっても異なるものであった。Fig.3.9～Fig.3.12 は各被験者が各開始位置においての物体を運搬した際の運搬物体の重心の軌道である。この軌道は試行回数 40 回のうち最後の 5 回のデータの平均軌道を示し、縦軸 Y 方向の変位、横軸に X 方向の変位をとったものである。最後の 5 回のデータの平均を用いる理由として、1 回の実験においても、1 回目と 40 回目では後半の軌道データの方がバラつきが少ないため、後半 5 回のデータの平均を用いる。この図のように運搬物体の軌道は各被験者、各位置によって異なっている。被験者 A は持ち上げ時において物体を一旦手前に大きく引いてから目標地点に向けてほぼ直線的な軌道を描いており、被験者 B は持ち上げ時において物体を一旦手前に少し引いてからおおよそその X 方向の最大変位付近まで運搬した後、下から目標地点に標準を合わせる軌道を描いている。被験者 C は位置 90%、100% においては手前に引かず目標地点に直線的な軌道を描いており、位置 80% においては直線的ではない。被験者 D は持ち上げ時において物体を一旦手前に少し引いてから目標地点に直線的な軌道を描いている。Fig.3.9～Fig.3.12 の各位置、各被験者での軌道の傾きを計算し、Table.3.3 にまとめる。軌道の傾きを計算した範囲は

Y=300mmからY=600mmの運搬途中の軌道が直線の範囲である。また傾きは線形近似で近似曲線を導き、導出した。Table.3.3を見ると被験者4人とも位置が近くなるほど傾きが大きくなることがわかる。これは、始点位置が近くなる分、つまり終点までのXの値が小さくなり、始点位置が変化してもYの値は変わらないので、近くなるほど傾きは大きくなったと考えられる。

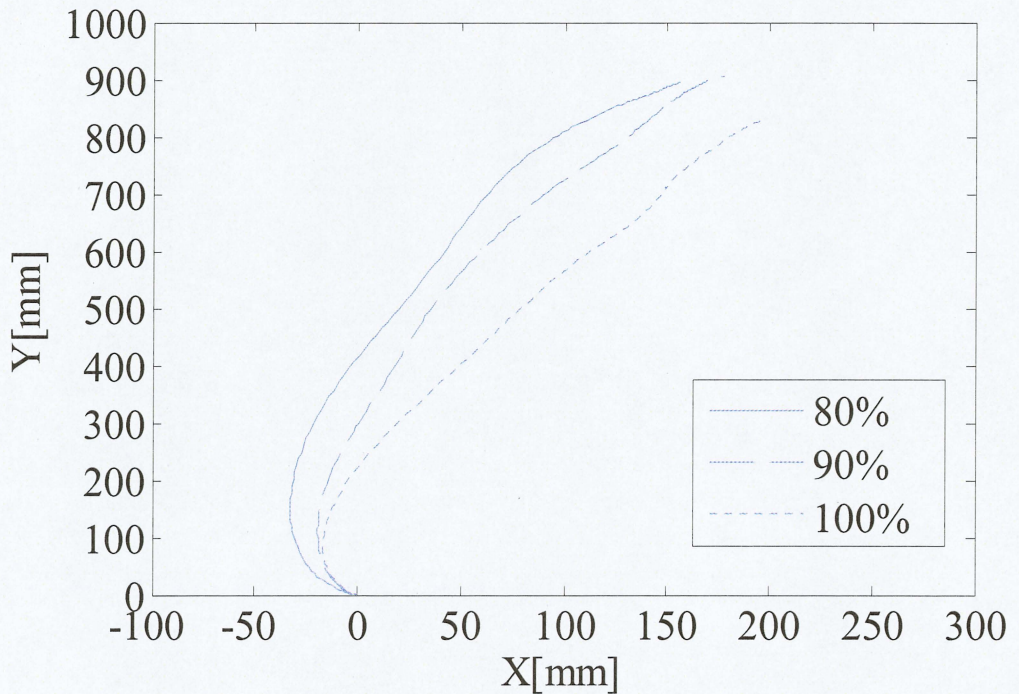


Fig.3.9 各位置での運搬物体の重心の軌跡(被験者 A)

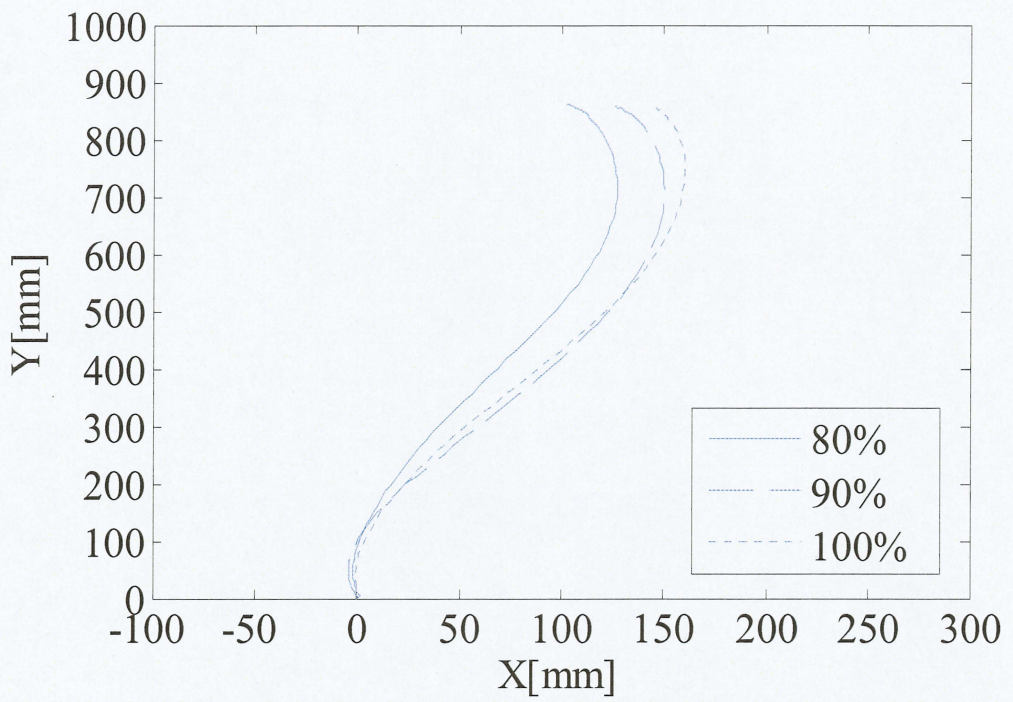


Fig.3.10 各位置での運搬物体の重心の軌跡(被験者 B)

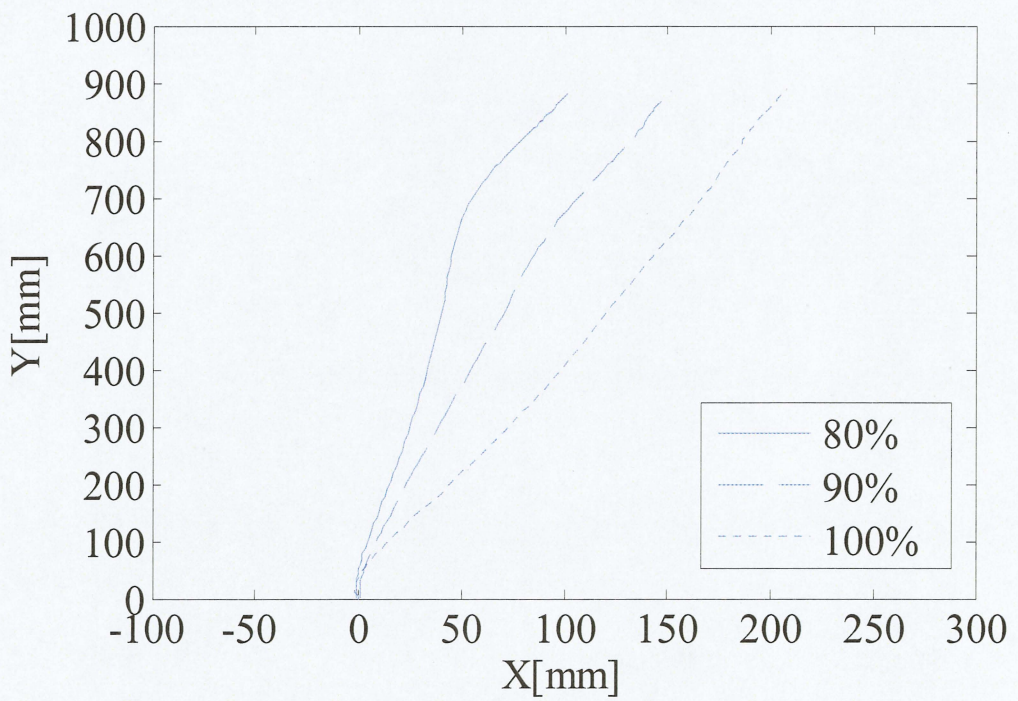


Fig.3.11 各位置での運搬物体の重心の軌跡(被験者 C)

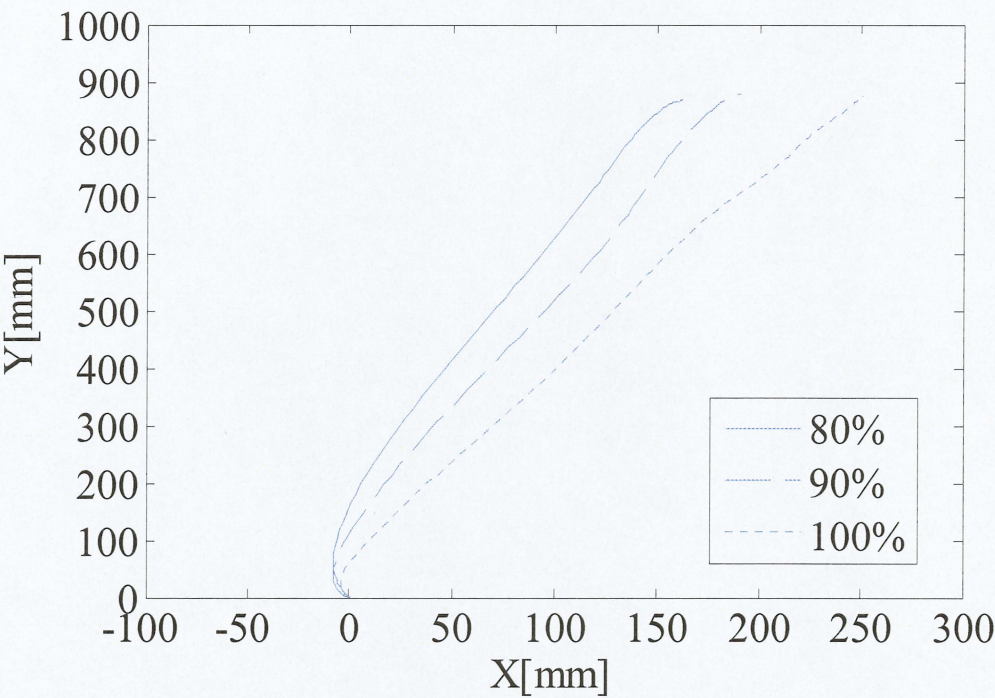


Fig.3.12 各位置での運搬物体の重心の軌跡(被験者 D)

Table.3.3 各位置での軌道の傾き

Subject	Slope of path		
	80%	90%	100%
A	4.8	4	3.2
B	3.8	3.5	3.1
C	14.9	6.5	4.3
D	4.3	3.8	3.5

3.2.2 開始位置による運搬物体速度・角速度の変化

開始位置の変化による物体の運搬速度と角速度変化について着目する. 運搬速度は運搬軌道に沿った接線速度で, 角速度は運搬物体の重心周りの回転角速度である.

Fig.3.13～Fig.3.16 は各被験者の各位置においての運搬速度であり, 縦軸に運搬速度の大きさ, 横軸に時間を示したものである. この運搬速度も軌道と同様に最後の 5 回の平均をとっている. 同様に Fig.3.17～Fig.3.20 は各被験者の各位置においての角速度の平均であり, 横軸に時間, 縦軸に角速度の大きさを示したものである. この角速度も軌道と同様に最後の 5 回の平均をとっている. 速度波計は単一のピークを持っている. 位置による影響は, どの被験者にも見られない. 接線速度, 角速度がそれぞれピーク値に達する時間を Table.3.4 に示す. Table.3.4 を見ると被験者 B, C, D はどの位置においても接線速度と角速度がピーク値に達する時間が同じであることがわかる. 被験者 A のみ, 角速度が接線速度より遅れてピーク値に達することがわかる. 時間にして 0.05 秒である.

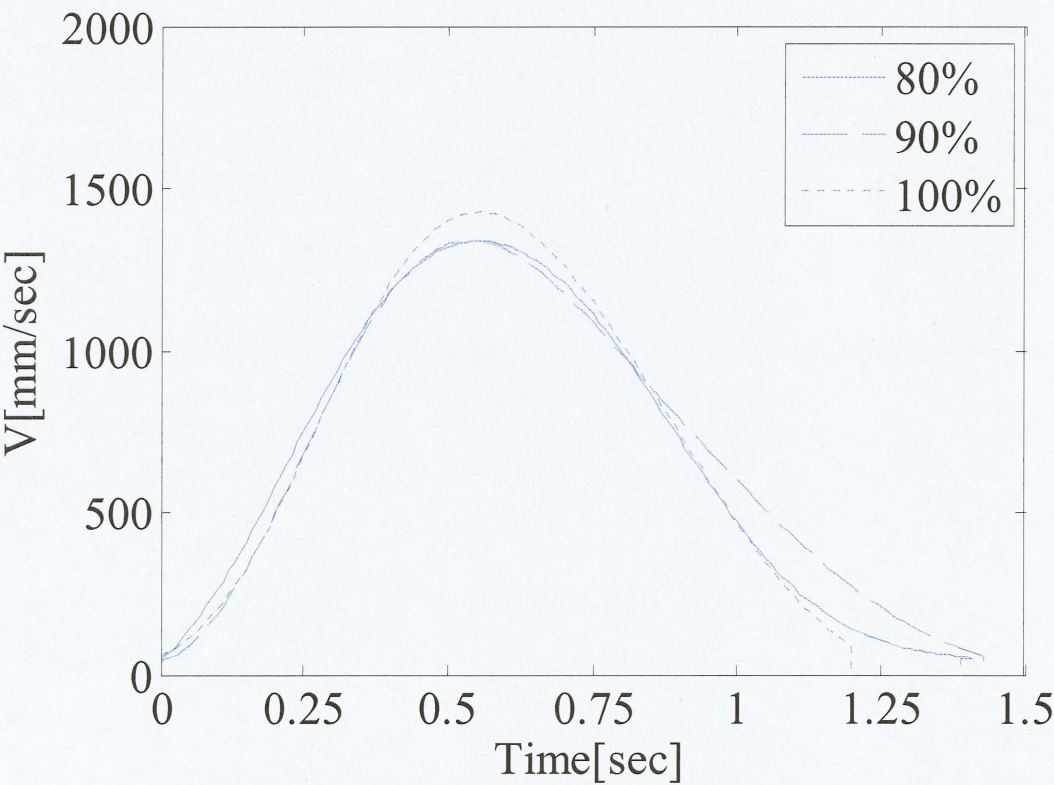


Fig.3.13 各位置での運搬速度(被験者 A)

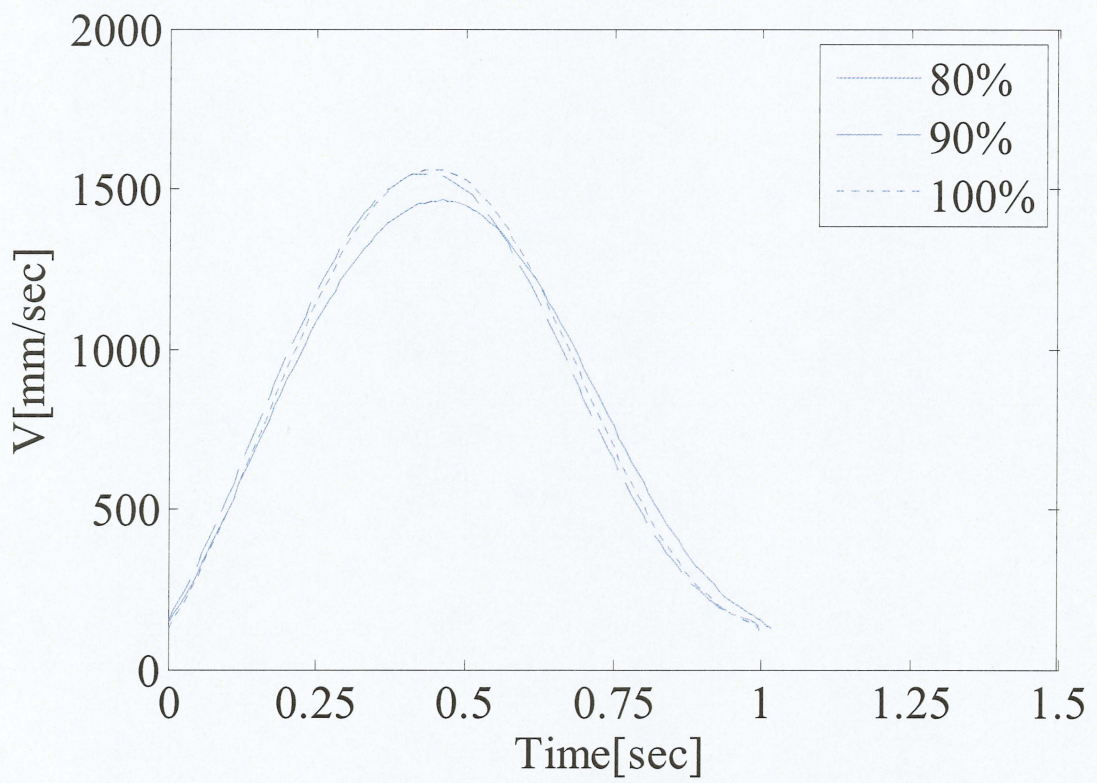


Fig.3.14 各位置での運搬速度(被験者 B)

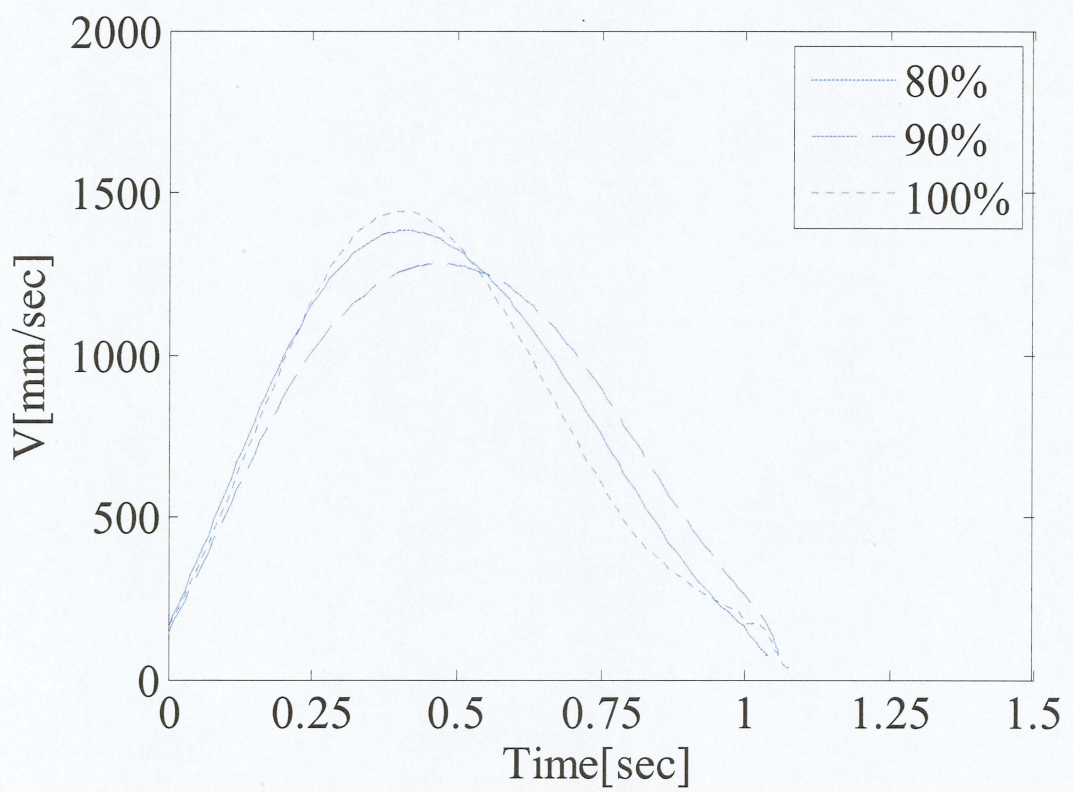


Fig.3.15 各位置での運搬速度(被験者 C)

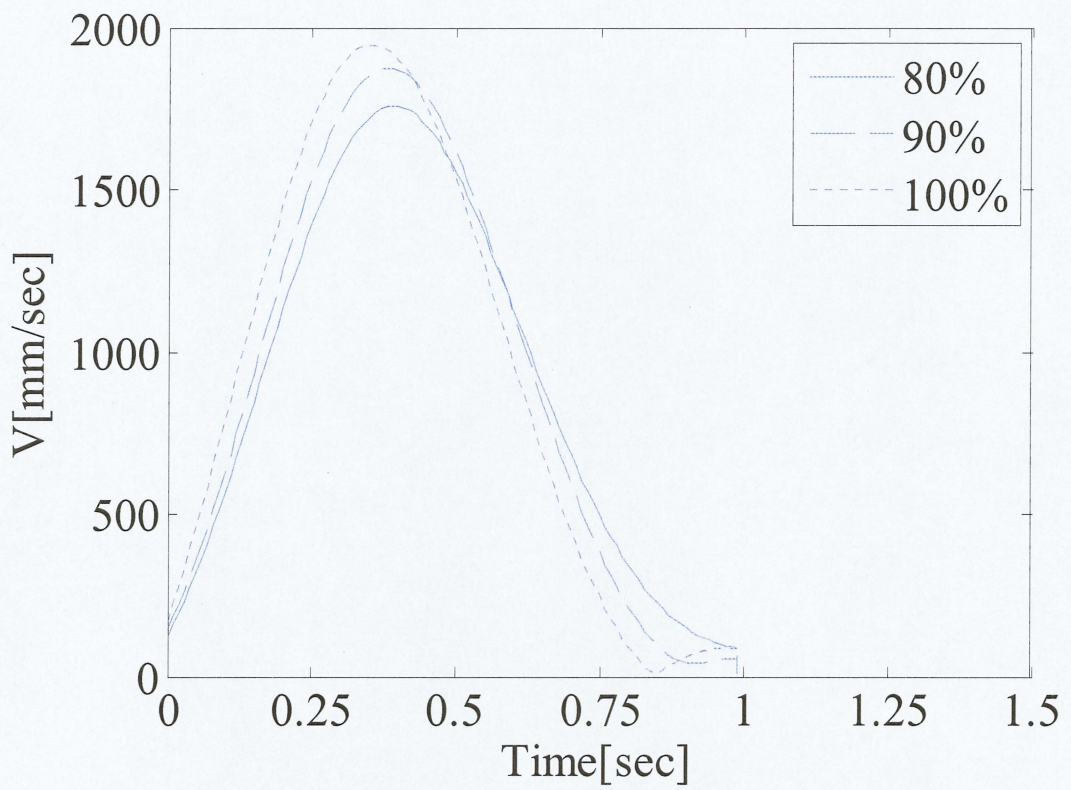


Fig.3.16 各位置での運搬速度(被験者 D)

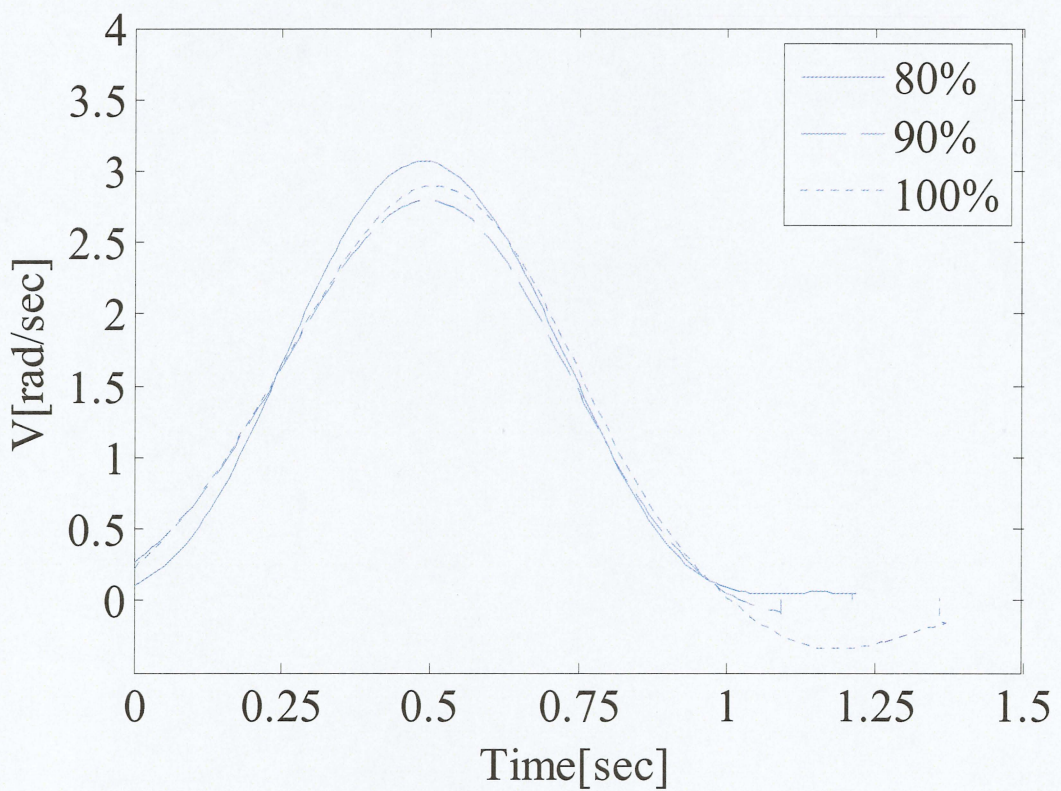


Fig.3.17 各位置での角速度(被験者 A)

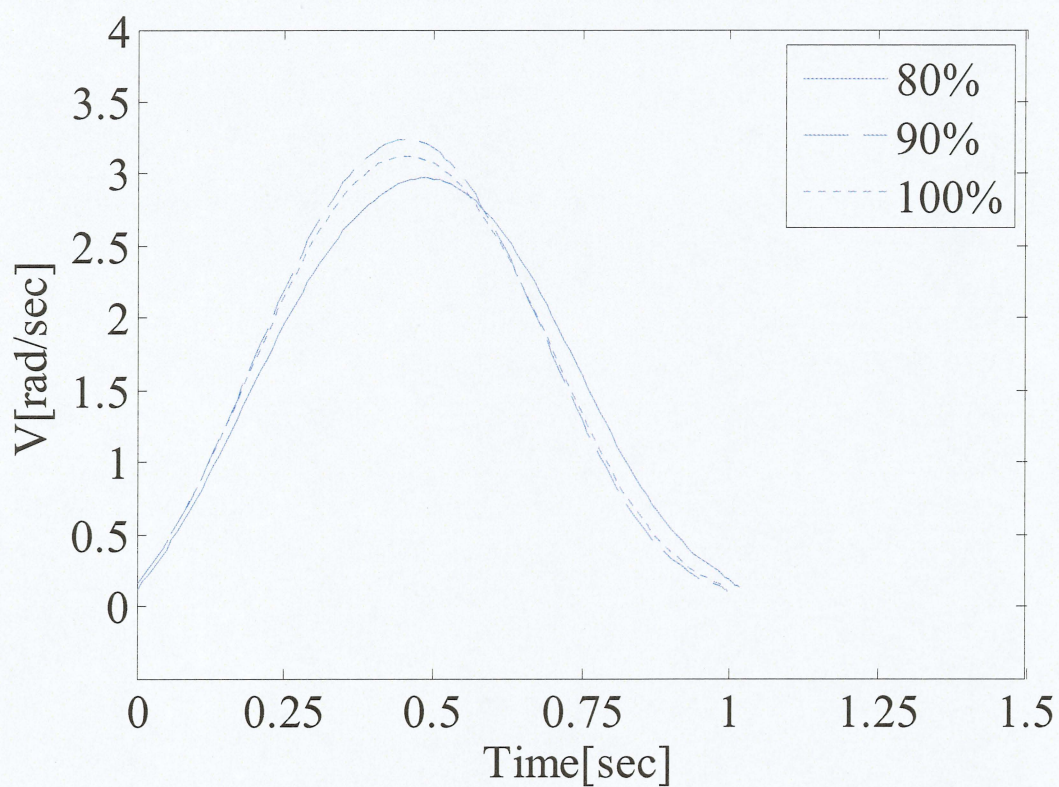


Fig.3.18 各位置での角速度(被験者 B)

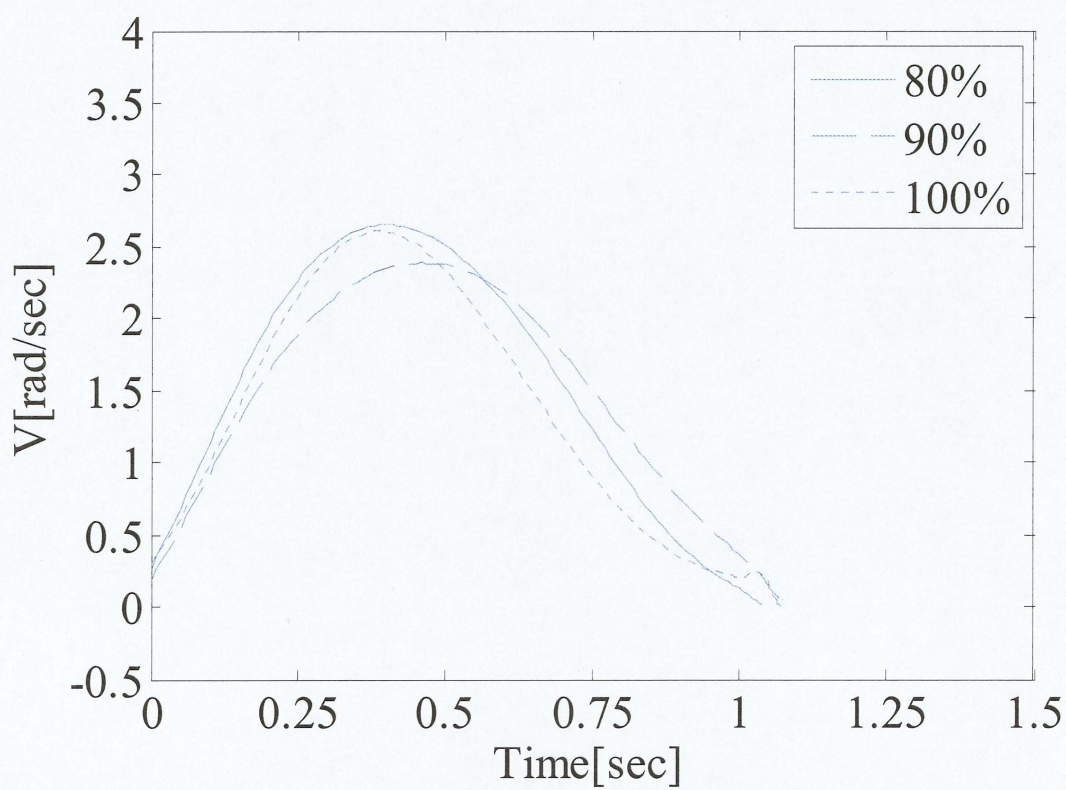


Fig.3.19 各位置での角速度(被験者 C)

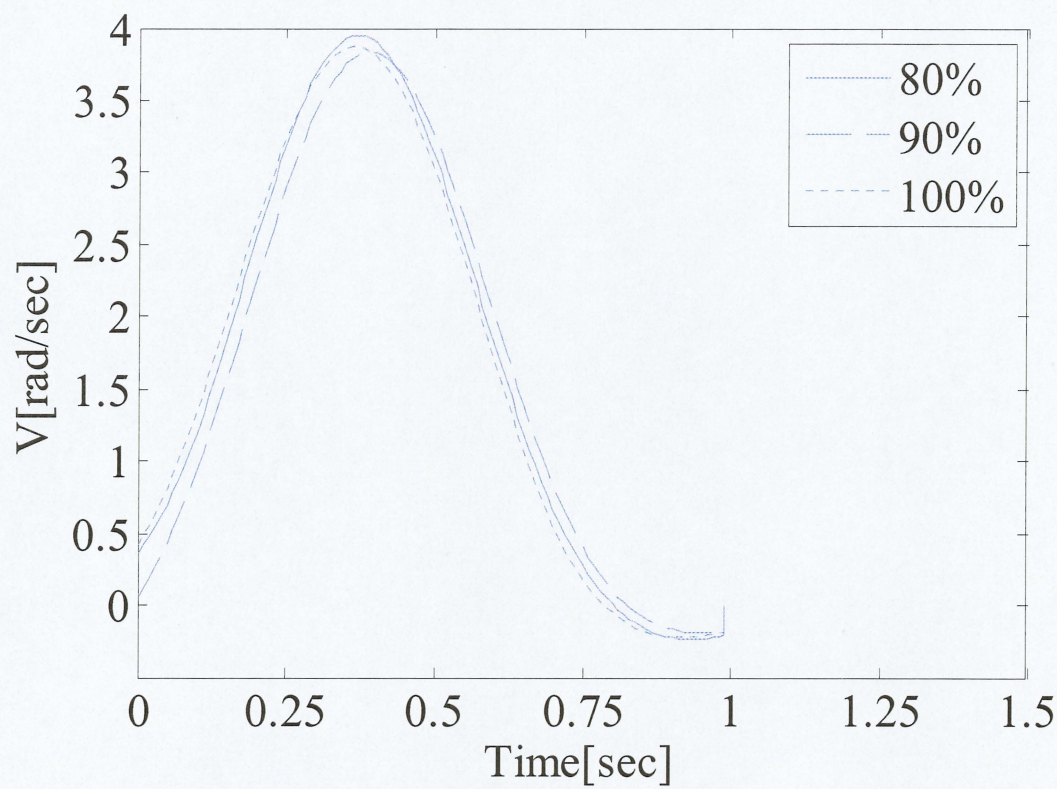


Fig.3.20 各位置での角速度(被験者 D)

Table.3.4 各位置での接線速度, 角速度がピーク値に達する時間

Subject	Velocity			Angular velocity		
	80%	90%	100%	80%	90%	100%
A	0.55[sec]	0.55[sec]	0.55[sec]	0.50[sec]	0.50[sec]	0.50[sec]
B	0.45[sec]	0.45[sec]	0.45[sec]	0.45[sec]	0.45[sec]	0.45[sec]
C	0.40[sec]	0.40[sec]	0.45[sec]	0.40[sec]	0.40[sec]	0.45[sec]
D	0.35[sec]	0.35[sec]	0.35[sec]	0.35[sec]	0.35[sec]	0.35[sec]

3.2.5 開始位置による各関節角度の変化

開始位置による人体の各関節角度の変化を見るため 2.1.4 項で定義されている足首, 膝, 腰, 腕, 肘, 手首の 6 つの関節の角度変位に着目する. Fig.3.21～Fig3.24 は各位置においての θ_1 から θ_6 までの角度変位の平均を示したものであり, 縦軸に角度変位, 横軸に時間である. 平均とは軌道と同様に最後の 5 回の平均である. 物体持ち始めの角度をゼロとし, そこからの角度変位の増減を示す. 被験者 4 人に共通して言えることは θ_1 (足首), θ_2 (膝)は位置によって差異はない, 特に被験者 B に関しては他の被験者 3 人と比べてみると, 位置による差異がないことがわかる. θ_3 (腰), θ_4 (腕), θ_5 (肘)は被験者 A, C は物体保持時において位置によって約 $0.17[\text{rad}](=10^\circ)$ づつの差があり, 突起物との距離が近くなるほど, 腰をそり, 肘を曲げており, 腕の角度変位も大きくなったと考えられる. 被験者 B は θ_4 (腕)に関して差はなく, θ_5 (肘)に関しては物体保持時において突起物までの距離が近い方が肘を曲げていることがわかる. 被験者 D は θ_4 (腕), θ_5 (肘)を物体保持時において, 約 $0.17[\text{rad}](=10^\circ)$ づつの差があり, 突起物との距離が近くなるほど, 肘を曲げており, 腕の角度変位も大きくなったと考えられる. θ_6 (手首)は, 被験者, 位置どちらも共通した要素は見られない. 物体保持時に比べ, 持ち始めに差がないのはどの位置においても持ち始める条件は変わらないためと考えられる.

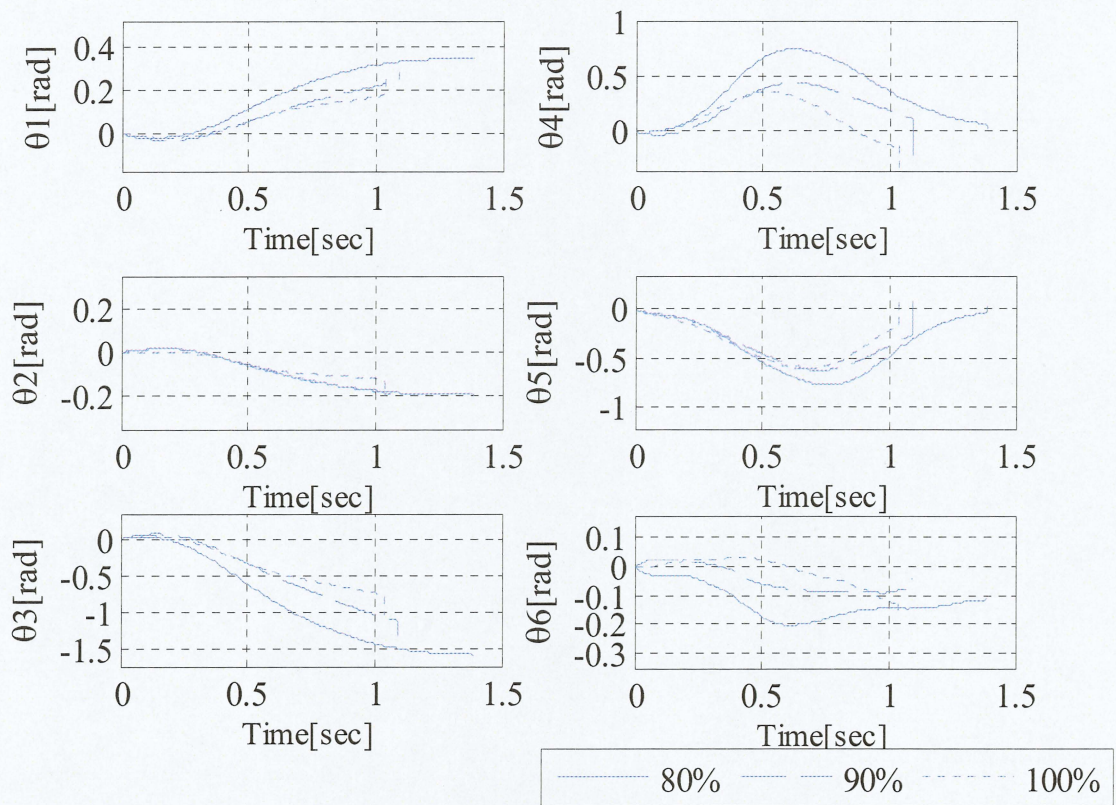


Fig.3.21 各位置での各関節角度の変位(被験者 A)

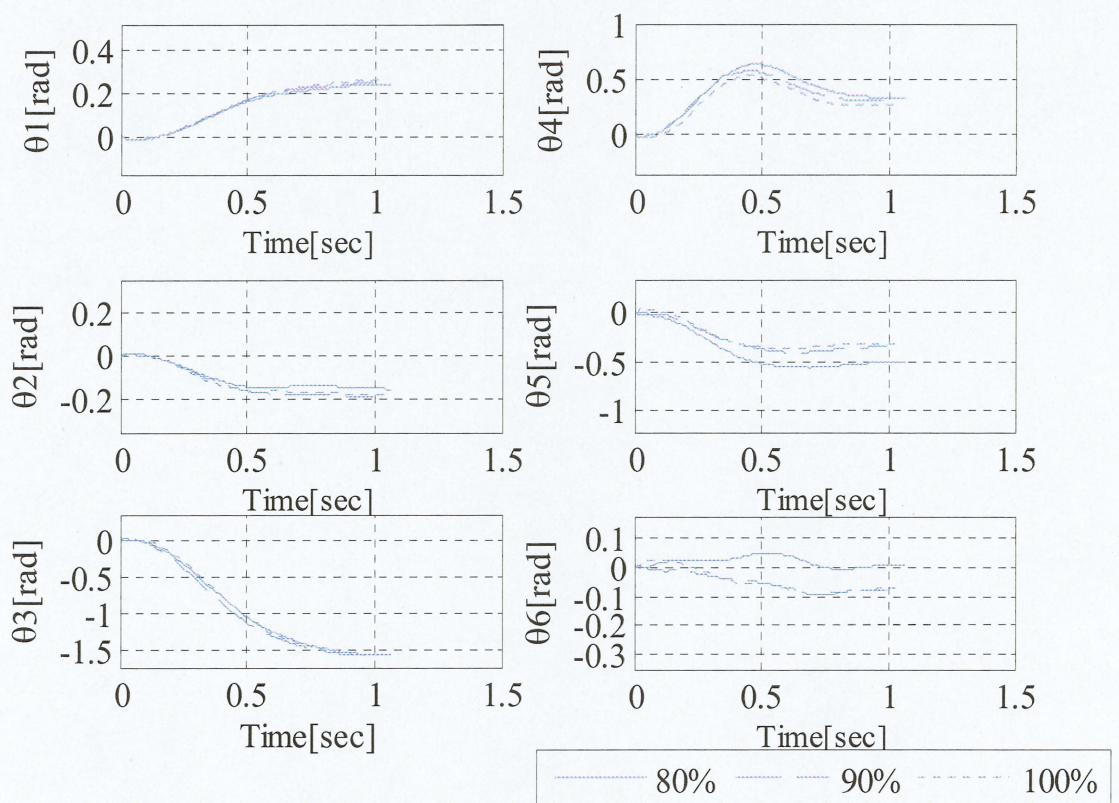


Fig.3.22 各位置での各関節角度の変位(被験者 B)

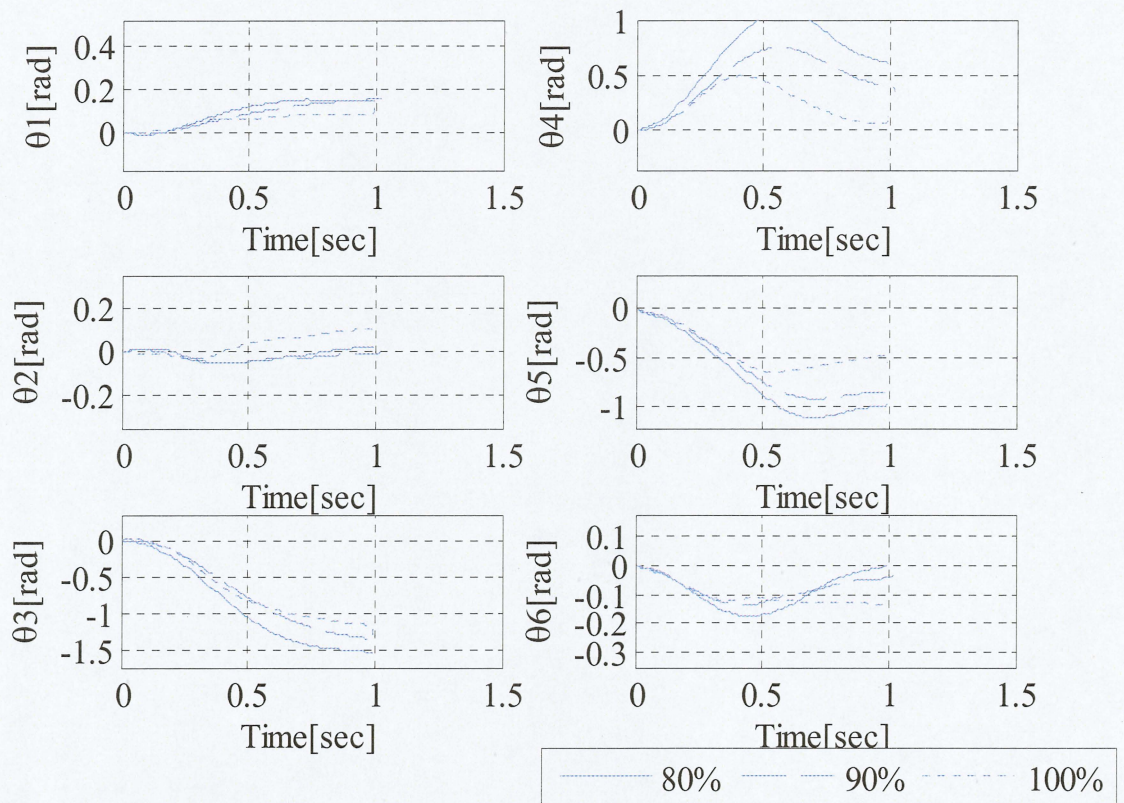


Fig.3.23 各位置での各関節角度の変位(被験者 C)

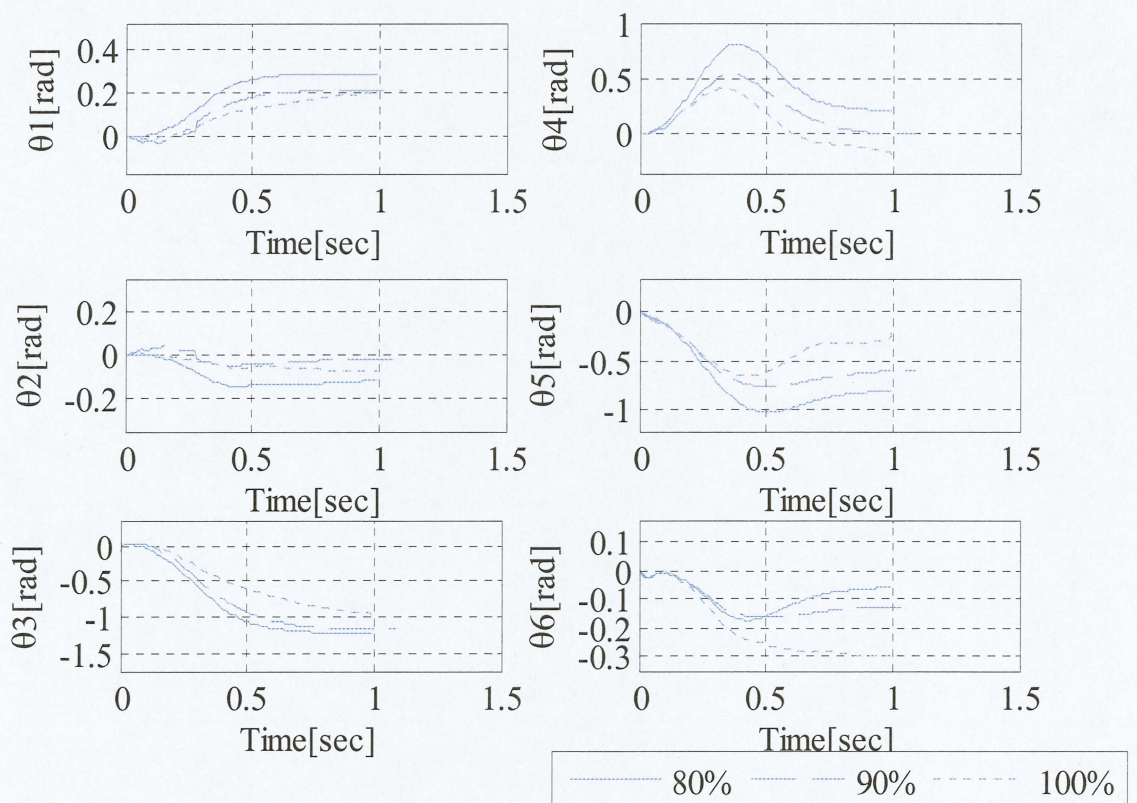


Fig.3.24 各位置での各関節角度の変位(被験者 D)

3.2.6 開始位置による人体の姿勢の変化

開始位置による人体の姿勢の変化を見るため、被験者につけた各関節のマーカーの座標を結んだ姿勢図に着目する。Fig.3.25 に被験者 A, B, C, D の各位置での物体保持時の平均姿勢を示す。平均とは軌道と同様に最後の 5 回の平均である。位置の違いによる影響を見るにあたり、各関節角度で述べたように足首、膝の関節角度には位置により差異がないので、位置により差異が見られる腕と肘の関節に着目する。被験者 A, D は物体保持時において、位置 100% においては肘を伸ばして、腕を肩の位置まで上げて物体を保持していることがわかる。被験者 B, C は 100% においても肘を曲げて物体を保持している。逆に位置 80% ではどの被験者においても肘を曲げていることがわかる。

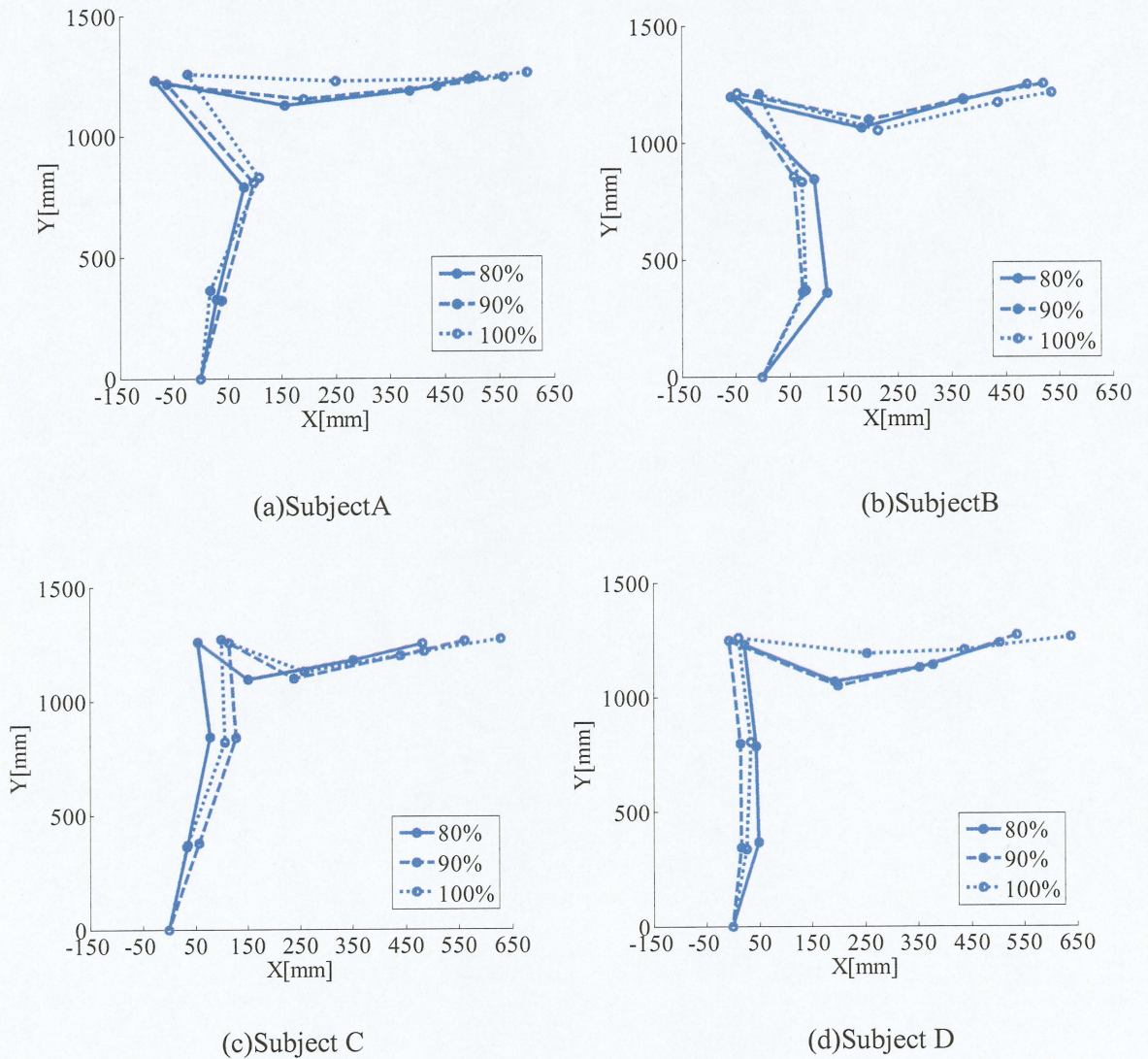


Fig.3.25 各位置での物体保持時の姿勢

3.2.7 開始位置による最大関節速度の変化

始点の位置の変化が各関節速度に与える影響を 3.1 項で得た実験データと比較する。
Table.3.4 は 5 日目の 40 回の平均を示している。Table.3.4 から被験者 4 名とも目標地点への距離が近づくにつれ手首以外の最大関節速度は増加する傾向がある。

Table.3.4 各関節の最大速度の平均

		$\theta_1(\text{rad})$	$\theta_2(\text{rad})$	$\theta_3(\text{rad})$	$\theta_4(\text{rad})$	$\theta_5(\text{rad})$	$\theta_6(\text{rad})$
A	80%	0.55	-0.79	-1.42	-2.48	2.34	-0.56
	90%	-0.38	-0.58	-1.01	-1.99	-2.18	-0.52
	100%	0.38	-0.56	-0.85	-1.52	-2.04	-0.41
B	80%	0.92	-1.15	-1.18	-3.24	-3.73	-0.75
	90%	0.55	-0.57	-1.00	2.02	-2.9	0.93
	100%	0.37	-0.50	-0.98	-1.11	-2.06	-1.12
C	80%	0.41	-0.73	-1.87	-2.68	-2.94	-0.59
	90%	0.29	-0.55	-1.45	-1.95	-1.69	-0.42
	100%	0.30	-0.64	-1.5	-1.64	-1.76	-0.53
D	80%	0.92	-1.15	-1.88	-3.24	-3.73	-0.75
	90%	0.55	-0.57	-1.00	-2.02	-2.92	-0.87
	100%	0.37	-0.50	-0.98	-1.11	-2.06	-1.12

第 4 章

可操作性での評価

本章では、次の動作を推定していく指標の一つとして前章で示した物体を運搬する作業者の姿勢をを基に可操作性を用いる事ができるかどうか検証する。

4.1 可操作性

可操作性は主にロボットアームの作業性を評価する指標としてアームの先端の位置や姿勢をどの程度自由に操作できるか、運動学的な観点から定量化した概念である可操作楕円体でビジュアルに表現されてきた。この概念を人間に適用し、姿勢から手先の動きを推定し、評価する。可操作性についてロボットマニピュレータを例に説明する。

n 自由度のロボットマニピュレータを考え、その n 次元関節変数ベクトルを q とし、手先効果器の位置および姿勢を表わす手先効果器位置ベクトルを $r = [r_1, r_2, \dots, r_m]^T$ ($m \leq n$)

とする。そしてこれらの 2 つのベクトル q と r の幾何学的な関係が

$$r = f_r(q) \quad (4.1)$$

で与えられるものとし、 r に対応する速度ベクトル v と関節速度 \dot{q} との関係が

$$v = J(q)\dot{q} \quad (4.2)$$

で与えられているものとする。ここで $J(q)$ はヤコビ行列であり、

$$J(q) = \frac{\partial r}{\partial q^T} \quad (4.3)$$

によって与えられる。 J と略記することもある。

いま、関節速度のユークリッドノルム $\|\dot{q}\|$ が $\|\dot{q}\| \leq 1$ を満足するような関節速度 \dot{q} を用いて

実現しうる手先速度 \dot{r} のすべてからなる集合を考えるとこれは、 m 次元ユークリッド空間の楕円体となる。この楕円体の主軸の長い方向は大きな手先速度が出しやすい方向であり、短い方向は小さな手先速度しか出せない方向である。したがってこの楕円体が球に近ければ、あらゆる方向にまんべんなく手先を動かせるといえる。このように、この楕円体は手先の可操作性を表わしていると見なせるので、可操作楕円体と呼ばれる。これを概念的に示したのが Fig4.1 である。

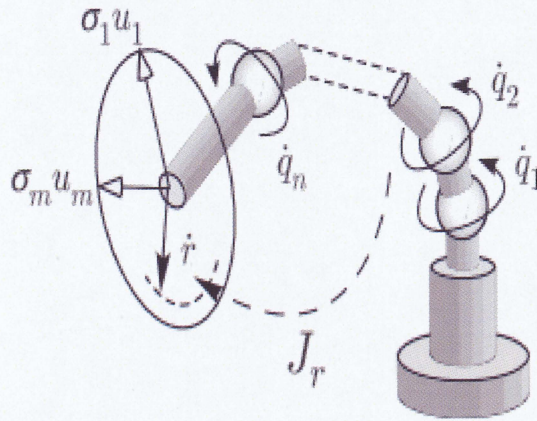


Fig.4.1 可操作楕円体^[24]

可操作楕円体の性質は以下のように証明される。

関節角度 \dot{q} のユークリッドノルムが

$$\|\dot{q}\|^2 = \sum_{i=1}^m \dot{q}_i^2 \leq 1 \quad (4.4)$$

を満足するような関節速度 \dot{q} を用いて実現しうる手先速度 \dot{r} のすべてからなる集合を考える。(4.2)式の一般解は

$$\dot{q} = J_r^+ \dot{r} + (I_n - J_r^+ J_r)k \quad (k \in R^n \text{は任意定数ベクトル}) \quad (4.5)$$

であることから、 $(I_n - J_r^+ J_r)^T J_r^+ = 0$ となることに注意すると

$$\begin{aligned} \|\dot{q}\|^2 &= \dot{q}^T \dot{q} \\ &= \left\{ J_r^+ \dot{r} + (I_n - J_r^+ J_r)k \right\}^T \left\{ J_r^+ \dot{r} + (I_n - J_r^+ J_r)k \right\} \\ &= \dot{r}^T (J_r^+)^T J_r^+ \dot{r} + 2k^T (I_n - J_r^+ J_r)^T J_r^+ + k^T (I_n - J_r^+ J_r)^T (I_n - J_r^+ J_r)k \end{aligned}$$

$$\geq \dot{r}^T (J_r^+)^T J_r^+ \dot{r} \quad (\because k^T (I_n - J_r^+ J_r)^T (I_n - J_r^+ J_r) k = \|(I_n - J_r^+ J_r) k\|^2 \geq 0) \quad (4.6)$$

が得られる. したがって(4.4)式より

$$\dot{r}^T (J_r^+)^T J_r^+ \dot{r} \leq \|\dot{q}\|^2 \leq 1 \quad (4.7)$$

となる. いま, J の特異値分解

$$J_r = U \Sigma_r V^T \quad (4.8)$$

を考える. ここで U, V はそれぞれ $m \times m, n \times n$ の直交行列であり, $\Sigma_r \in R^{m \times n}$ は

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

で与えられる. また, $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$ は J の特異値とよばれ, $J^T J$ の固有値 $\{\lambda_i, i=1, 2, \dots, n\}$ の平方根 $\sqrt{\lambda_i}$ の大きいものから順に m 個とったものである. さらに U の第 i 列ベクトルを u_i で表わせば, 可操作楕円体の主軸は $\sigma_1 u_1, \sigma_2 u_2, \dots, \sigma_m u_m$ で与えられる.

4.2 運搬姿勢を用いた可操作楕円体の計算

まず手先の位置を求める. 人体の関節角度については2.1.4項で述べている. 足首から膝までの長さを l_1 , 膝から腰までの長さ l_2 , 腰から肩までの長さ l_3 , 肩から肘までの長さ l_4 , 肘から手首までの長さ l_5 , 手首から物体の重心までの長さを l_6 とし, Fig.4.2 に示す. 手先の位置 (x_6, y_6) は式(4.10), (4.11)で示される.

$$\begin{aligned} x_6 = & l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ & + l_5 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + l_6 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} y_6 = & l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_4 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ & + l_5 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + l_6 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \end{aligned} \quad (4.11)$$

次にヤコビ行列(J)を求めるために式(4.3)に代入し, J を式(4.8)のように特異値分解することで楕円の主軸と傾きを求める.

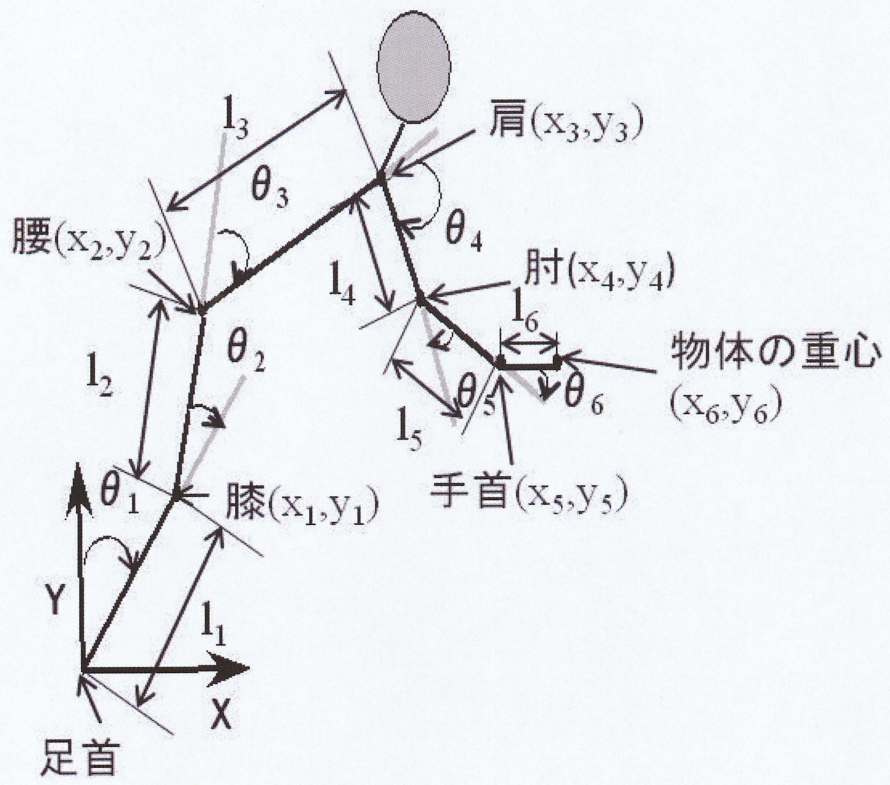


Fig.4.2 人の各関節の長さ

4.3 運搬姿勢を可操作楕円体での評価

4.3.1 可操作楕円体

ここでは, 3.1 項で計測した運搬姿勢を用いて, 可操作楕円体で評価する.

被験者 4 名の姿勢を可操作性で評価した図を Fig4.3~4.6 に示す. 縦軸に Y 方向の変位, 横軸に X 方向の変位を示している. 図に示される姿勢は一番下から 0.1 秒, 0.3 秒, 0.5 秒, 0.7 秒, 0.9 秒の時の姿勢である. それぞれの手先にある楕円が可操作楕円体であり, 矢印は実際の運搬時の速度ベクトルの方向である. Table.4.1 は運搬時の速度ベクトルの方向 を基準とし, 可操作楕円体の主軸が長い方向とのずれている角度を示す. 時計周りに正をとっている.

被験者 4 名を比較すると, 被験者 A, B の可操作楕円体の主軸の長い方向と被験者 C, D の可操作楕円体の主軸の長い方向が同じ傾向である. これは, 被験者 A, B と被験者 C, D の運搬軌道が同じ傾向にあったのと同関係があると考え. 速度ベクトルの方向と可操作楕円体の主軸が長い方向は被験者 4 名とも大幅にずれていた.

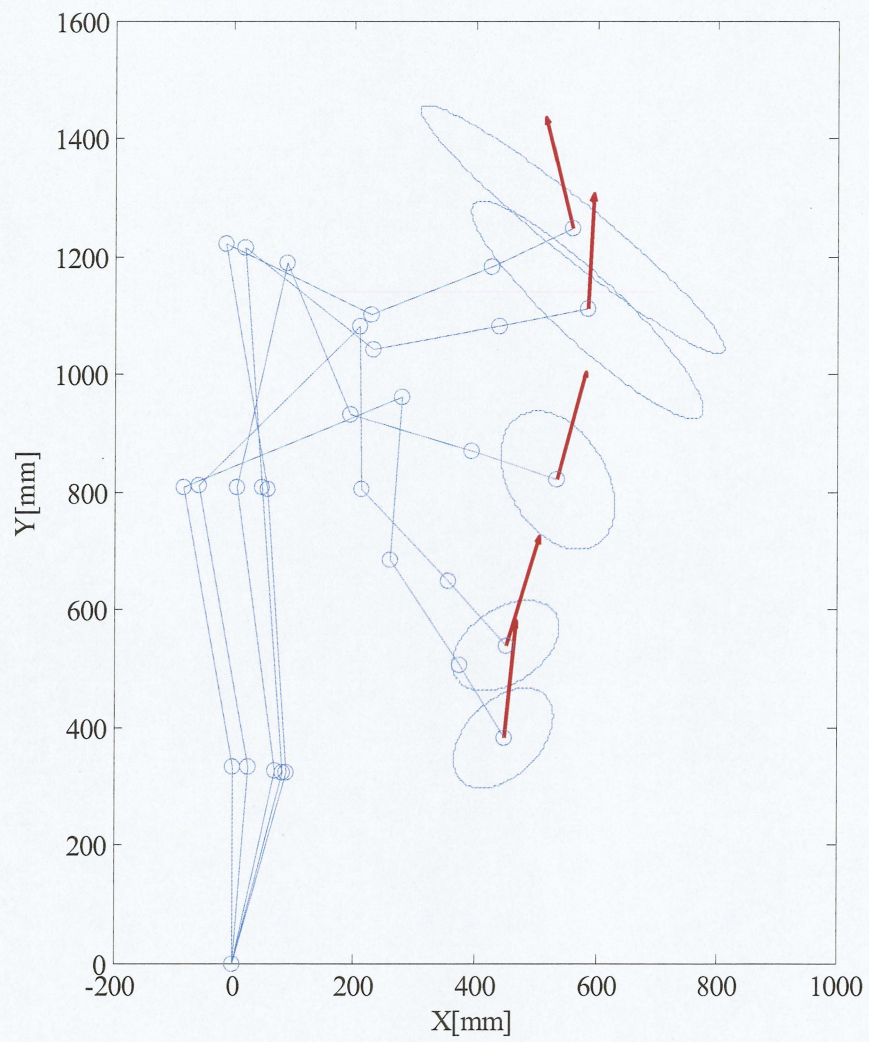


Fig.4.4 被験者 B の姿勢に対する可操作楕円体

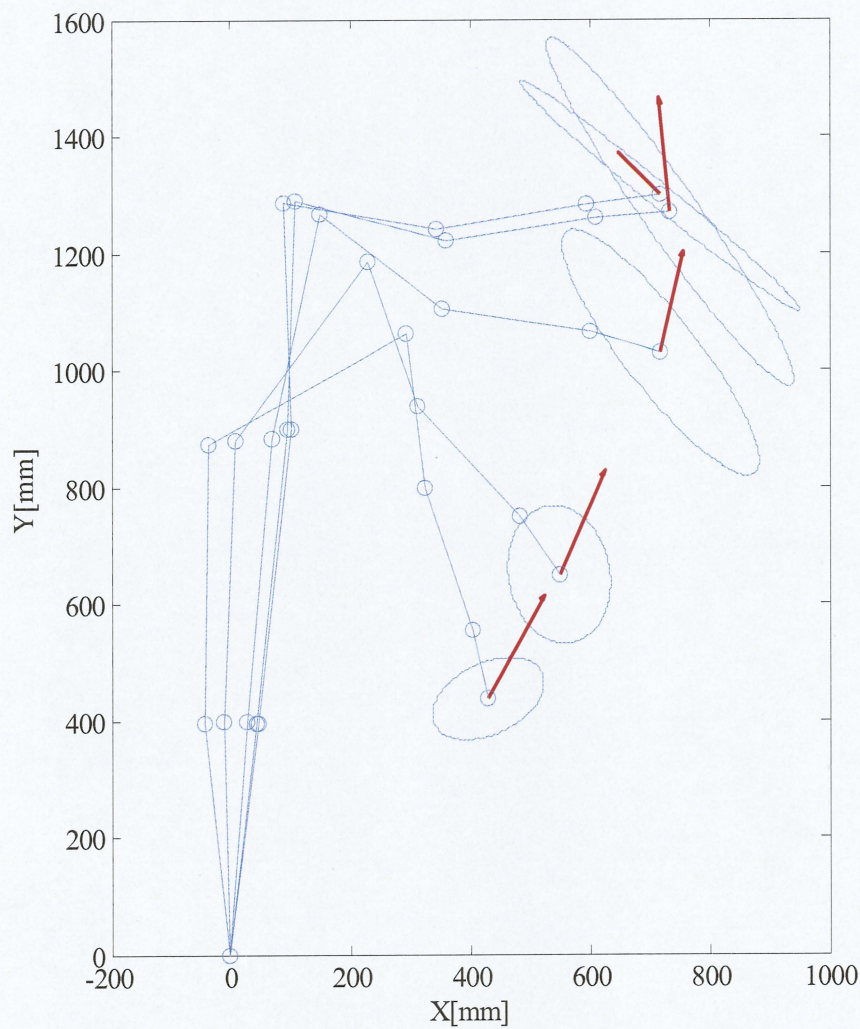


Fig.4.5 被験者 C の姿勢に対する可操作楕円体

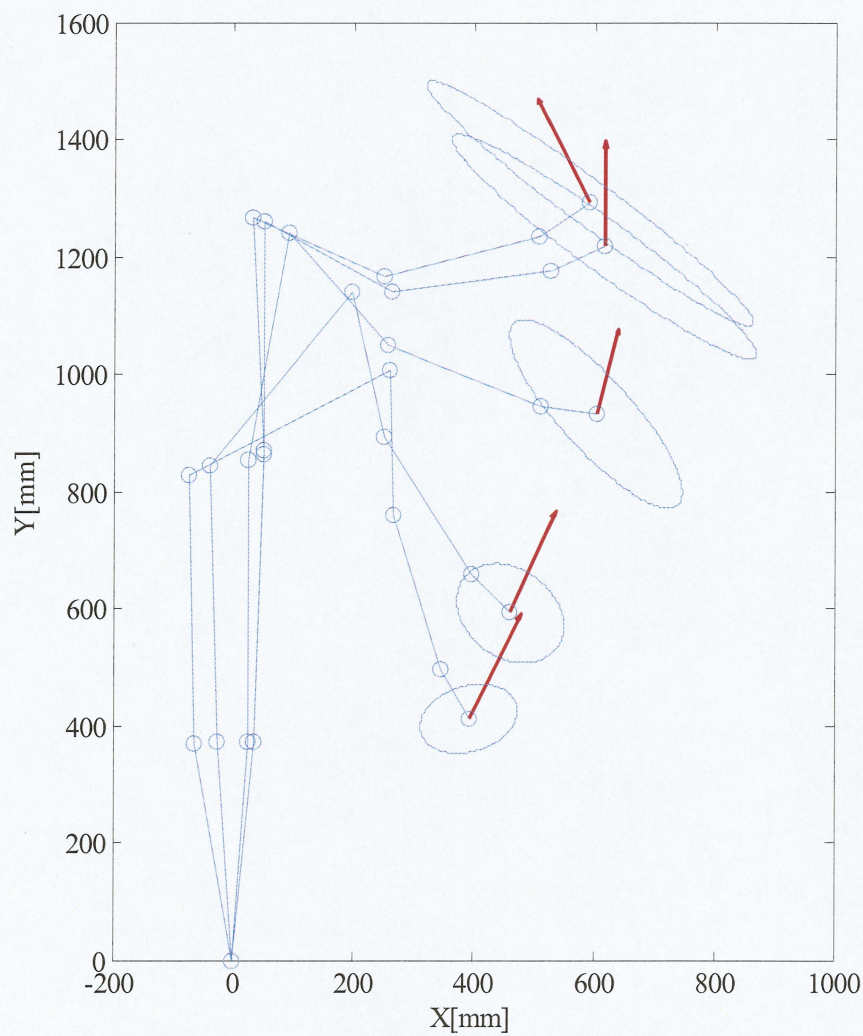


Fig.4.6 被験者 D の姿勢に対する可操作楕円体

Table.4.1 運搬時の速度ベクトルと可操作楕円体の角度のずれ

	A	B	C	D
0.1 秒時の角度[rad]	0.75	0.66	0.55	0.83
0.3 秒時の角度[rad]	-0.62	0.72	-0.66	-1.3
0.5 秒時の角度[rad]	-1.01	-0.78	-0.95	-0.99
0.7 秒時の角度[rad]	-0.61	-0.81	-0.6	-0.92
0.9 秒時の角度[rad]	-0.74	-0.80	-0.08	-0.45

4.3.2 各関節速度を考慮した可操作楕円体

4.3.1 項で計算した可操作性は各関節の最大速度がすべて等しいとしている。そこで、つぎに関節ごとに最大速度を変えた場合を考える。各関節速度を考慮した可操作楕円体を定義するには、まず、各関節の出し得る最大速度を \dot{q}_{\max} とし、またマニピュレータに与えられる作業クラスに対する考察などをもとに各手先変数 v_j に対する希望最大速度 $v_{j\max}$ を定める。そして

$$\hat{\dot{q}} = [\hat{\dot{q}}_1, \hat{\dot{q}}_2, \dots, \hat{\dot{q}}_6]^T, \hat{\dot{q}}_i = \dot{q}_i / \dot{q}_{i\max}, \hat{\dot{v}} = [\hat{\dot{v}}_1, \hat{\dot{v}}_2, \dots, \hat{\dot{v}}_6]^T, \hat{\dot{v}}_i = \dot{v}_i / \dot{v}_{i\max} \text{ とおけば}$$

$$\hat{\dot{v}} = \hat{J}(q) \hat{\dot{q}} \quad (4.12)$$

が得られる。ただし

$$\hat{J}(q) = T_v J(q) T_q^{-1} \quad (4.13)$$

$$T_v = \text{diag}\left(\frac{1}{v_{1\max}}, \frac{1}{v_{2\max}}, \dots, \frac{1}{v_{\max}}\right) \quad (4.14)$$

$$T_q = \text{diag}\left(\frac{1}{\dot{q}_{1\max}}, \frac{1}{\dot{q}_{2\max}}, \dots, \frac{1}{\dot{q}_{\max}}\right) \quad (4.15)$$

とする。ここでの計算はここで、 $v_{1\max}, v_{2\max}$ を考慮せず、1 として $\dot{q}_{i\max}$ には運搬実験で判明した各関節の最大速度を入れる。

被験者 4 名の姿勢から各関節速度を考慮した可操作性で評価した図を Fig4.7～4.10 に示す。縦軸に Y 方向の変位、横軸に X 方向の変位を示している。図に示される姿勢は一番下から 0.1 秒, 0.3 秒, 0.5 秒, 0.7 秒, 0.9 秒の時の姿勢である。それぞれの手先にある楕円が可操作楕円体であり、矢印は実際の運搬時の速度ベクトルの方向である。Table.4.2 は運搬時の速度ベクトルの方向を基準とし、可操作楕円体の主軸が長い方向とのずれている角度を示す。時計周りに正をとっている。

被験者 4 名を Table.4.1 と Table.4.2 の運搬時の速度ベクトルと可操作楕円体の角度のずれを比較すると、各関節速度を考慮した方が実際の速度ベクトルの方向とのズレが減少傾向にあり、速度ベクトルの方向と可操作楕円体の方向が一致してきている。

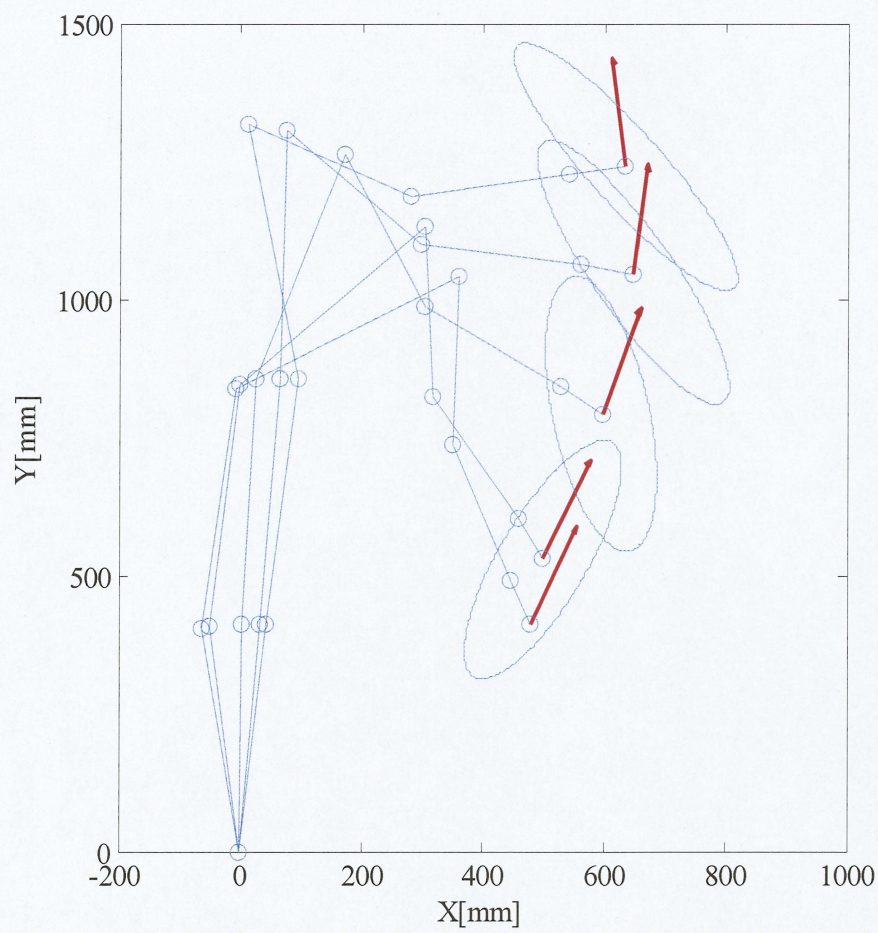


Fig.4.7 被験者 A の姿勢に対する可操作楕円体

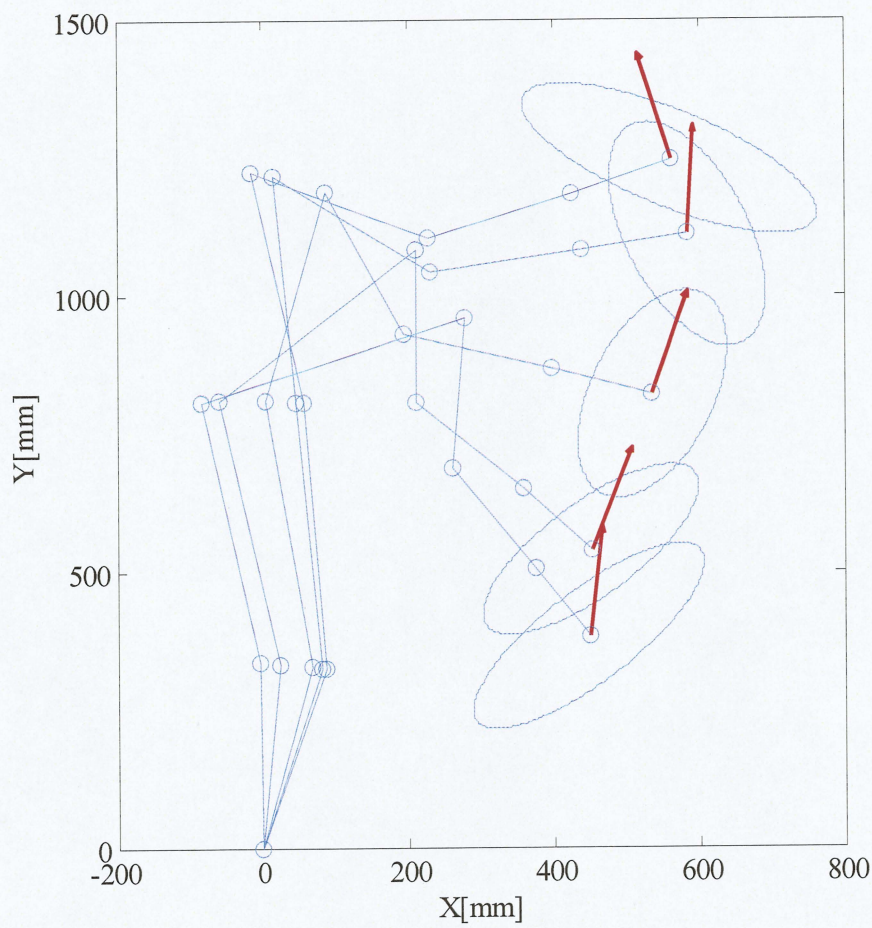


Fig.4.8 被験者 B の姿勢に対する可操作楕円体

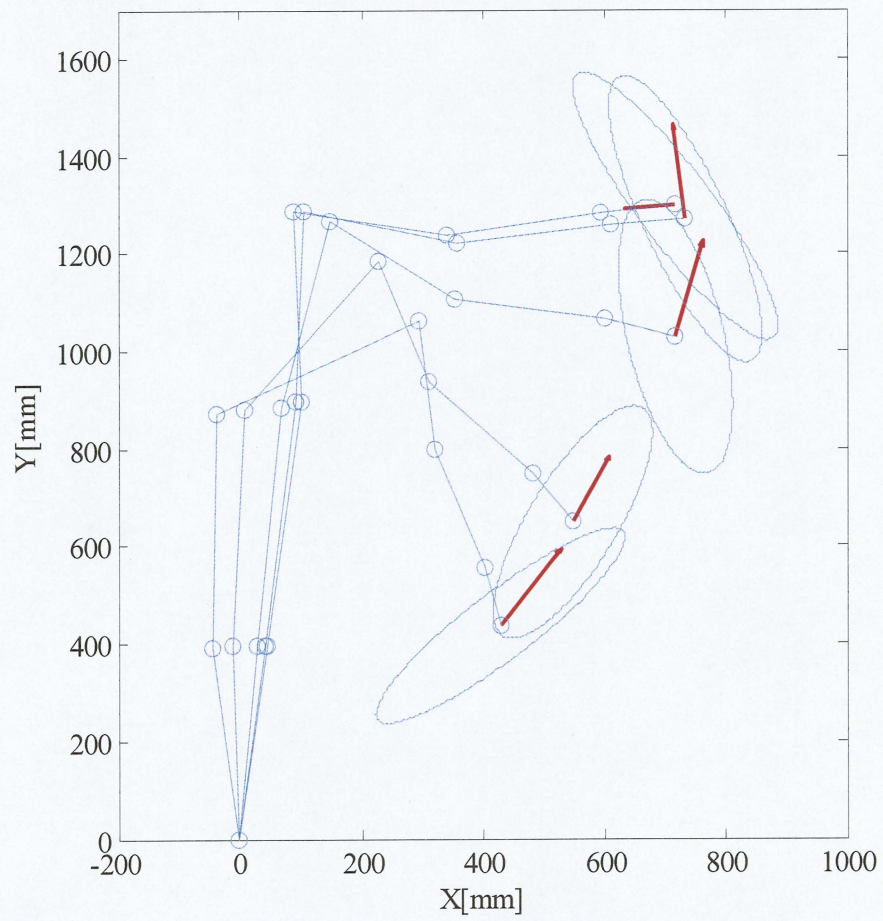


Fig.4.9 被験者 C の姿勢に対する可操作楕円体

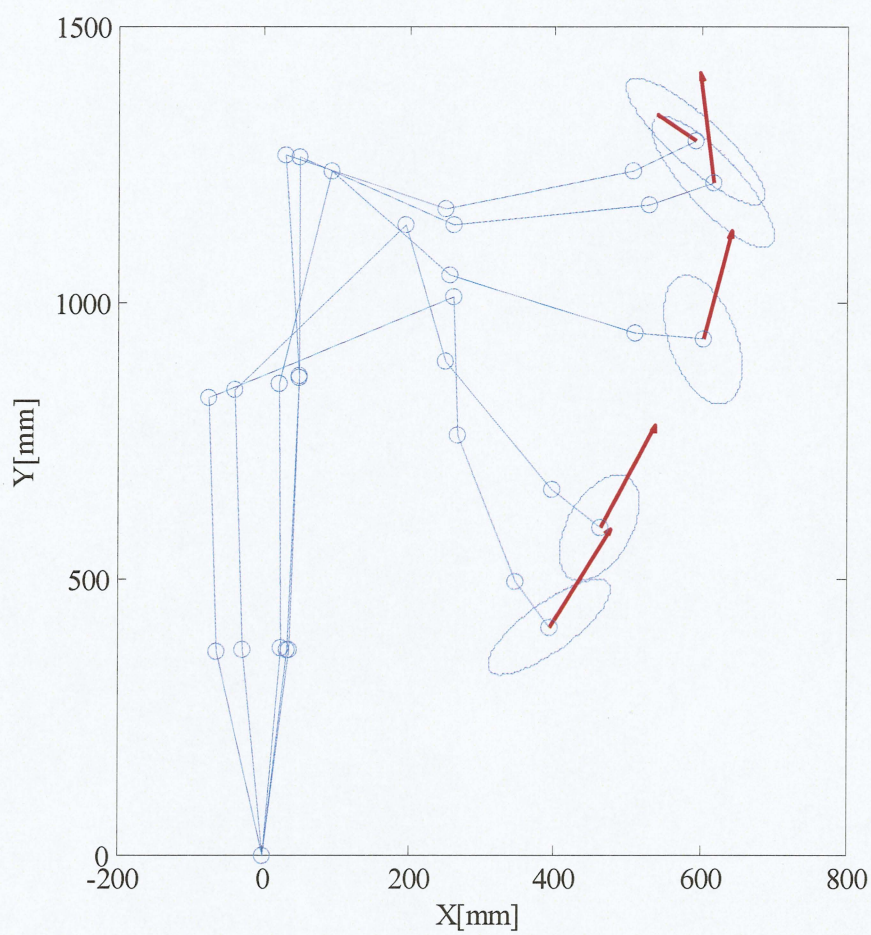


Fig.4.10 被験者 D の姿勢に対する可操作楕円体

Table.4.2 運搬時の速度ベクトルと可操作楕円体の角度のずれ

	A	B	C	D
0.1 秒時の角度[rad]	0.47	0.61	0.33	0.33
0.3 秒時の角度[rad]	0.15	0.54	-0.04	-0.09
0.5 秒時の角度[rad]	-0.49	0.05	0.48	0.51
0.7 秒時の角度[rad]	-0.68	-0.41	-0.35	-0.59
0.9 秒時の角度[rad]	-0.55	-0.96	-0.27	-0.21

第5章

結論

5.1 本研究のまとめ

本論文では、作業者の次の運搬動作を推測する事に焦点をあてて、運搬物体の運動と持ち上げ姿勢について考察し、運搬姿勢の各関節の角度と各関節速度を用いて作業者の次の動作の予測手法を可操作性で評価した。

その結果、運搬回数が与える影響は、運搬物体の物体速度、角速度の最大値は日数を重ねるにつれ増加の傾向にあり、運搬軌道は4日目以降で被験者4名ともにばらつきが減少した。従って、実験は4日以上を行えば、安定したデータを得られるといえる。また、始点位置の変化が運搬物体に与える影響は、運搬物体の軌道は人によりばらつきがあるが、始点が近づくほど軌道の傾きは大きくなり、最大関節速度は増加する傾向にあると明らかとなった。最後に、各関節の角速度、最大速度が同じ重みである事を仮定した一般的な可操作性は、目標地点まで物体を運搬する被験者の手先の方向と可操作楕円体の主軸の長い方向が被験者又は姿勢によって相違があった。次に各関節速度を考慮した可操作性は、一般的な可操作性と比較して、各関節速度を考慮した方が実際の速度ベクトルの方向とのズレが減少傾向にあり、速度ベクトルの方向と可操作楕円体の方向が一致してきている。さらに精度を高めると予測手法として採用できると考える。

5.2 今後の課題

今回とは異なる条件, 例えば高さや軌道に条件を与えた時の持ち上げ動作への影響の解析を行う. 具体的な被験者全員に共通する運搬姿勢と物体の関係を明らかにすることが必要である. またいくつかの動作パターンがわかった時にその動作の切り替え条件が定められればパワーアシスト装置の制御にも有用になる. また, 人の動作を予測する手法の一つである可操作性で人の運搬動作を評価した. 今後, 各姿勢ごとの腰、肩、腕の最大関節速度を用いて, 可操作性の精度を高める。

参考文献

- [1]国際分散投資と毎月分配型ファンドのススメ, <http://www.nikkoam.jp/products/susume/01.html>
- [2]小林邦生, 呉世訓, 堀洋一:「人に優しいパワーアシストドアの研究—動的人間モデルを使ったドア開閉パターンの解析と応用」, 電気学会研究会資料, Vol.IIC-8, pp.39-44, (2008)
- [3]三好孝典, 小笠原慎一, 北川秀夫, 寺嶋一彦:「負荷変動に対するロバスト性を考慮した H_{∞} 制御パワーアシスト車いすの開発」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.738, pp.386-394, (2008)
- [4]H.Kazerooni:「The Extender Technology at the University of California,Berkeley」, 計測と制御, Vol.34,No.4,pp.291-298, (1995)
- [5]木口量夫, 学和輝, 春園祐樹, 佐々木誠:「人間下肢動作補助用ロボットの研究」, 日本機械学会年次大会講演論文集, Vol.7, pp.341-342, (2006)
- [6]遠山茂樹, 米竹淳一郎:「超音波モータを応用したパワーアシストスーツ」, バイオメカニカル学会誌, Vol.30, No.4, pp.189-193, (2006)
- [7]筑波大学大学院システム情報工学研究科山海研究室, ロボットスーツ HAL, http://sanlab.kz.tsukuba.ac.jp/r_hal.php
- [8]積際徹, 横川隆一, 柴田浩:「人間とロボットの力学的な協調を実現するインピーダンス制御法—安全・安心社会を創生する介護・福祉ロボットの実現を目指して—」, 日本機械学計算力学講演会講演論文集, Vol.20, pp.48-49, (2007)
- [9]伊藤賢, 積際徹, 横川隆一, 柴田浩:「人と協調して動作するパワーアシスト移動マニピュレータの設計と制御」, 日本機械学会関西支部定時総会講演会講演論文集 Vol.82, pp.14, (2007)
- [10]池浦良淳:「人間中心型ロボティクス総合特集号」人間とロボットによる協調作業", システム/制御/情報/, Vol.44, No.12, pp.682-687, (2000)
- [11]林亮太, 池浦良淳, 水谷一樹, 中村久, 蓑島博仁:「パワーアシスト装置を用いた物体の位置決め操作」, 日本機械学会東海支部総会講演会講演論文集, Vol.51, p.p.156-157, (2002)
- [12]加藤寛之, 池浦良淳, 野口真平, 水谷一樹:「接触操作を考慮した産業用パワーアシスト装置のインピーダンス制御」, 日本機械学会, Vol.51, p.p.127-128, (2003)
- [13]山田陽滋, 鴻巣仁司, 森園哲也, 梅谷陽二:「自動車組立工程における搭載作業のためのスキルアシストの提案」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.666, p.p.161-168, (2002)
- [14]山田陽滋:「生活支援に向けた工学技術の応用—工業用ロボットを中心として—」, 理学療法基礎系専門領域研究会, Vol.32, No.4, pp.245-252
- [15]三好孝典, 小島秀人, 寺嶋一彦, 川合悦蔵:「鋳型合わせ作業に対する三自由度ワイヤ懸架式パワーアシストシステムの開発と制御」, 鋳造工学会誌, Vol.80, No.7, p.p.403-409, (2008)
- [16]三好孝典, 鈴木裕一, 寺嶋一彦:「天井クレーンにおけるパワーアシストシステムの構築」, 日本三重大学大学院 工学研究科

- 機械学会論文集 C, Vol. 70, No.696, pp.2427-2434, (2004)
- [17]高橋徹, 米谷史雄, 奥田裕之, 稲垣伸吉, 鈴木達也:「表面筋電位と力センサを併用したパワーアシストシステムの開発」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 pp. 1A1-D06(1) - 1A1-D06(4) , (2008)
- [18]積際徹, 横川隆一, 原敬:「並進・回転運動を伴う人間ロボット協調運動作業におけるロボット制御法」, 日本機械学会論文集 C 編 Vol.68, No.666, pp.483-490, (2002)
- [19]高橋徹:「筋電位信号を用いた作業支援機採設計と製作」, (2009), http://www.suzlab.nuem.nagoya-u.ac.jp/research/Takahashi_OperationAssistWithEMG/index.html
- [20]小黒芳男, 中村壘, 真達宏, 北岡正敏:「輸配送業務における作業姿勢による作業 情報の評価に関する研究」, 日本経営工学会論文誌, Vol.49, No.1, pp.1-16, (1998)
- [21]JuvyBalingit, 岩瀬弘和, 北岡正敏:「荷役作業における人体モデルを用いた作業姿勢に関する研究」, 日本経営工学会論文誌, Vol.55, No.2, pp.77-88, (2004)
- [22]堀洋一, 磯将人:「負荷特性に応じたインピーダンス制御を用いたセンサレスパワーアシスト法」電気学会産業計測制御研究会, Vol.IIC-02, No.15-44, pp.143-148 , (2002)
- [23]吉川恒夫:ロボット制御基礎論, コロナ社, (1988)
- [24]山田直樹, 米澤泰延, 三浦泰彦, 正守一郎, 川口克也, 中村誠之:「操作性向上のための上肢操作性予測手法の開発」, (2003),
http://www.mazda.co.jp/philosophy/gihou/pdf/2003_No035.pdf
- [25]石川直毅, 藤田政之:「可視性を用いた冗長マニピュレータの動的視覚フィードバック制御」, 東京工業大学卒業論文, (2006)

謝辞

本研究を進めるにあたり、研究の方針や指導、MATLABならびにその他のソフトウェアの使用方法など種々のご助言を賜り、池浦良淳 教授に心より感謝し、今後の更なるご活躍を心より祈っております。

また、本研究を進めるにあたり、研究室内発表などでの手厳しくも的確な指摘、ご助言を賜りました早川聡一郎 准教授に心より感謝いたします。

本研究において、実験装置の設計、製作等についての様々なご助言を賜り、研究の内外で大変ご尽力して頂きました澤井秀樹 技術職員に心より感謝しております。

また、私の様な未熟者に1年間、終始熱心に協力し励まして頂き、研究の進行に大いに貢献してくれた長田大君、伊藤将志君に心より感謝し、今後の益々のご活躍を期待しております。

本研究にあたり、お忙しい中実験に協力して頂いた被験者の皆様に深く感謝の意を表わします。そして、研究室での2年間を非常に実りある有意義なものにできたのは、同じ時間を共有できた同期の安藤雅人、天野洸人、清水輝、廣瀬昭貴、三島一洋君の存在が非常に大きかったと感じております。心より感謝し、今後の更なる飛躍を期待しております。

最後に、システム設計研究室の博士課程の皆様、修士1年、学部生、卒業生の皆様に心より感謝の意を本論文の結びとさせていただきます。