
平成 21 年度 修士学位論文

人間どうしの三次元物体運搬動作特性解析に関する
研究

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
矢野 岳水



目次

| | |
|-------------------------------|----|
| 第1章 緒言 | 1 |
| 第2章 人間どうしの上下、左右方向における協調物体運搬実験 | 3 |
| 2.1 実験装置の構成 | 3 |
| 2.2 躍度最小モデルを用いた動作解析 | 5 |
| 2.3 協調運搬実験 | 6 |
| 2.4 実験結果と考察 | 8 |
| 2.4.1 協調動作の変位・速度波形 | 8 |
| 2.4.2 躍度最小モデルによる動作のなめらかさ評価 | 10 |
| 2.4.3 動作中の物体の傾き角度評価 | 18 |
| 2.4.4 物体の重心の平均速度 | 22 |
| 2.5 本章のまとめ | 23 |
| 第3章 モニター上の目標位置を変更した実験 | 24 |
| 3.1 実験条件、目的 | 24 |
| 3.2 実験方法 | 25 |
| 3.3 実験結果と考察 | 26 |
| 3.3.1 躍度最小モデルによる動作のなめらかさ評価 | 26 |
| 3.3.2 動作中の物体の傾き角度評価 | 33 |
| 3.3.3 物体の重心の平均速度 | 36 |
| 3.4 本章のまとめ | 38 |
| 第4章 結言 | 39 |
| 参考文献 | 41 |
| 謝辞 | 42 |

第1章

緒言

現在、我が国は少子高齢化が進んでおり、高齢者（65 歳以上）の人口の割合は総人口の約 20%であり、1950 年以降上昇を続けている。この割合は、今後も上昇を続け、2050 年には約 40%と推計されている [1]～[3]。15～64 歳の生産年齢が不足する時代が到来しようとしており、今後は工場内の製造業用ロボットだけでなく、介護・福祉分野での次世代ロボットのニーズが高まっている [4]。少子高齢化の影響で、今後は介護者の補助が不足することが考えられ、介護者の負担を軽減することが重要である。本研究では、人間と協調して人や物を持ち上げて搬送することができる介護支援ロボットに注目する。通常は介護者 2 人で行う協調動作を片方の人間をロボットに置き換え、さらにパワーアシストを行うことで介護者の負担を軽減させるのが目的である。この場合、人間に脅威を与えず、違和感のないスムーズで自然な動作により人間と協調できるロボットが必要となる。

本研究室では、人間どうしの最適な協調動作を対象として解析を行い、その結果を人間と協調するロボットの制御に応用することを目的として研究を行っている [5]～[7]。先行研究では、人間どうしの協調動作における視覚の影響を研究した。その結果、人間は協調動作を実現するためには視覚情報が不可欠であることがわかった。また、動作中の力・トルクを計測し、協調動作中のコミュニケーションとして力・トルクも重要な役割を果たしていることがわかった [7]。人間と協調するロボットの制御に応用することを実現するには、人間どうしでの協調動作の特性を把握することが重要である。

本研究では良好な協調動作の指標として、動作のなめらかさ、動作中の物体の傾きを評価することを考える。動作のなめらかさに関しては、躍度最小モデルを評価として用いることにする。2 人の被験者がそれぞれ 1 つの物体の両端のグリップを把持し、上下・左右方向に協調して物体を搬送する実験により、人間どうしの物体搬送時の協調特性の解析を行う。第 2 章では、聴覚を遮断した実験や被験者に目標位置を教えない実験を行ったことについて述べる。被験者は物体の位置をリアルタイムで表示するモニターを見ながら実験を行ったが、動作終了の目標位置の目印を物体の中心にする場

合、両端にする場合の条件を加えた実験も行った。この実験について第3章で述べる。実験を行うことにより、人間どうしの協調動作時では、どのような情報交換が良好な協調動作に影響するか明らかにする。

第2章

人間どうしの上下、左右方向における協調物体運搬実験

本研究では、2人の被験者がそれぞれ1つの物体の両端のグリップを把持し、上下・左右方向に協調して物体を搬送する実験を行った。人間どうしでの協調動作において、どのような情報が動作に影響するのかを研究するため、実験条件として、被験者に動作開始の合図をしないことで聴覚を遮断した条件、被験者に目標位置を教えない条件を試した。そして、動作のなめらかさ、動作中の物体の傾き、動作速度を解析した。動作の開始の合図がない場合や目標位置を知らされていない場合は良好な協調動作が実現できないと予想される。本章では、躍度最小モデルを用いた動作解析と実験方法、結果と考察について述べる。

2.1 実験装置の構成

本研究で使用した実験装置の構成をFig. 1に示す。Fig. 1中の物体の詳細をFig. 2に示す。Fig. 2は実験に使用する両側にグリップのついた長さ0.6mの物体である。Table.1に実験で使った3次元位置センサの仕様を示す。両側にグリップのついた物体には、位置変化を計測するための三次元位置センサ (Northern Digital INC. Optotrak Certus System) のマーカー4つが取り付けられている。Fig. 1のように、三次元位置センサが物体に取り付けられた4つのマーカーの位置を検出する。三次元位置センサで検出された位置情報は、受信ボードを介してコンピュータに送られる。2つのモニターは、位置センサからの情報により物体の位置をリアルタイムで表示する。2人の被験者は、それぞれのモニター上で物体の位置、傾きを確認しながら協調動作を行う。モニターを使用した目的は、ひとつに、協調動作終了時の目標位置の目印をリーダー、フォロアーそれぞれ

にマーカーで示すためであり、もうひとつは、被験者が自分の目で見るとより正確に物体の傾きを認識できるようにし、物体を正確に平行移動できるようにするためである。計測時間は7秒間で、その間に被験者は協調動作を行う。なお、サンプリング周波数は30Hzとした。

Table.1 3D Position Camera system specification

| | |
|---|--|
| Maximum 2D Accuracy | 0.1 mm |
| Maximum 3D Accuracy | 0.15 mm |
| Resolution | 0.01 mm |
| Focus type | Far Focus |
| Focus Range | X axis 3.6m Y axis 2.6m Z axis(2.3m to 6m from camera) |
| Maximum sampling rate | 4600Hz |
| Strobe type | Marker |
| Position sensor dimension | 161mm x 200mm x 1126mm |
| System Control Unit type | S type |
| Maximum numbers of markers | 512 |
| Maximum numbers of rigid body | 170 (3 markers per rigid body) |
| Numbers of position camera that can be used simultaneously | 8 |
| Maximum numbers of strobes connected to System control unit | 10 |
| Host computer connection | PCI |
| Marker Voltage | 6~12 |

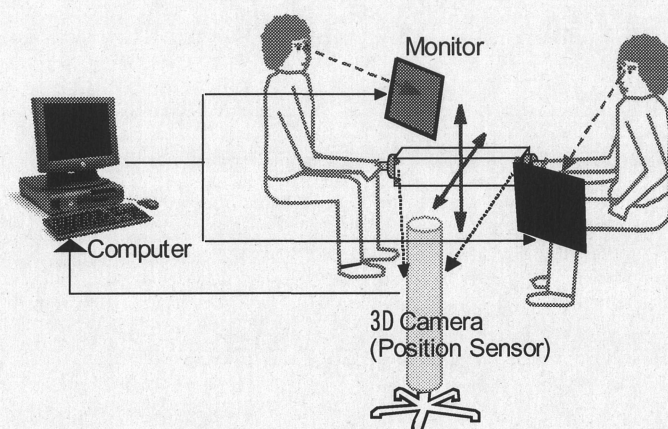


Fig.1 Experimental device

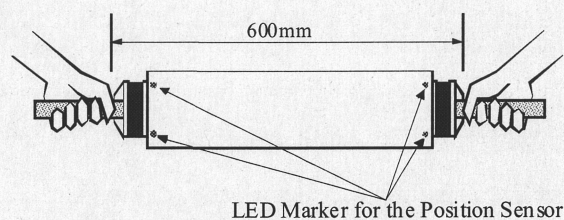


Fig.2 Object with grips

2.2 躍度最小モデルを用いた動作解析

本論文は人間どうしの協調特性の解析のために良好な協調動作の指標のひとつとして、動作のなめらかさを評価することを考え、躍度最小モデルを用いることにする。躍度最小軌道は、1 人の人間が自然に腕を動かしたときの手先の軌道であるが、2 人の人間どうしの一自由度協調作業においても、躍度最小軌道となることが示されている[5][8]。運動軌道の粗さを示す躍度は、手先位置の3階微分で示される。時間 t における手先位置の座標の位置ベクトルを $\mathbf{X}=(x, y, z)$ とおくと運動軌道の評価関数は式 (1) のように躍度の2乗積分値として表せる。

$$J = \frac{1}{s} \int_0^1 \left(\frac{d^3 \mathbf{X}}{d\tau^3} \right) \left(\frac{d^3 \mathbf{X}}{d\tau^3} \right)^T d\tau \quad (1)$$

ただし、 $t=0$ で動作を開始したものとし、 t_f を動作時間とすると $\tau=t/t_f$ である。また、動作距離を s とする。このような式 (1) の躍度の2乗積分値が最小となる運動が、躍度最小軌道であり、その速度波形は動作の中間点で頂点を持つベル型となる。躍度最小軌道の手先位置座標の位置ベクトルを $\mathbf{X}_{mj}=(x_{mj}, y_{mj}, z_{mj})$ とすると、これは次のような時間 t の5次関数で与えられる。

$$\mathbf{X}_{mj}(t) = \mathbf{X}_o + (\mathbf{X}_f - \mathbf{X}_o)(15\tau^4 - 6\tau^5 - \tau^3) \quad (2)$$

ただし、 \mathbf{X}_o は動作開始位置であり、 \mathbf{X}_f は動作終了位置を示す。このように、躍度最小軌道を生成するには、始点・終点の位置と動作時間が与えられれば決定でき、この条件での最もなめらかな動作となる。

理想的ななめらかな協調動作は躍度最小軌道となり、速度軌道は動作の中間点で頂点を持つベル型となる。物体の静止時には、速度は0となるため、動作開始終了点を判別しやすい。この速度波形に注目し、躍度の2乗積分値とともに実速度軌道と躍度最小軌道の速度軌道との差を動作時間にわたって積分した評価関数 ER (Error) 値を計算し、協調動作のなめらかさを評価する。協調動作は上下、左右それぞれの一次元で行ったので、例えばX軸で示すとER値は次のようになる。

$$ER = \frac{1}{s} \int_0^1 (\dot{x} - \dot{x}_{mj})^2 d\tau \quad (3)$$

動作解析では、リーダー、フォロアーそれぞれの把持位置と物体の重心における躍度の2乗積分値（式(1)）とER値（式(3)）を求めた。なお、躍度の2乗積分値、ER値とも値が小さいほど協調動作がなめらかであることを示す。また、式(1)、式(3)とも時間の変数に $\tau = t/t_f$ を用い、動作距離 s で除することにより、時間と距離で規格化しており、動作距離、動作時間の長短に関係なく協調動作のなめらかさを評価することができる。

2.3 協調運搬実験

本実験では、被験者はリーダー(leader 主導側)とフォロアー(follower 追従側)に分かれ、2人の被験者が一つの物体の両端をそれぞれが把持し、協調して上下、左右方向に運搬する。Fig. 3 は、人間どうしでの協調動作をする実験の様子である。物体の両端のグリップを2人がそれぞれ把持し、協調して物体を平行移動させる。計測時間7秒間のうちに、リーダーが任意のタイミングで動作を開始し、決められた方向へ物体を動かして静止させる。フォロアーは物体が傾かずに平行移動するように、リーダーに追従する。被験者2人はモニターを見て物体の位置、傾きを把握しながら動作を行う。被験者2人は手先位置をそろえるために椅子に座って実験した。被験者数は3人で、3通りの被験者の組み合わせのデータを解析した。

Fig. 4, 5 は、それぞれ左右方向、上下方向の場合のリアルタイムで物体の位置を表示するモニターの例である。モニターは、それぞれの被験者が実際の物体を観察しているのと同じ方向に表示されるようにした。左右方向の場合、動作を終了する際の目標位置の目印として、両方のモニターの物体を示す長方形の下側になるようにシールを貼り付けた。すなわち、目印はそれぞれの被験者の把持している側に貼り付けられている。モニターには、開始位置と4つの目標位置の合計5つの目印をつけている。

上下、左右方向それぞれで動作距離は長(0.2m)・短(0.1m)の2種類で、目標位置はTable. 2に示すように4つとなり、それぞれの目標位置で5回ずつ合計20回行った。両方向で0.4mの移動距離は、座った状態での人間の腕の可動範囲をもとに決定した。

実験では聴覚による影響を考え、リーダーの動作開始の合図ありの場合となしの場合の条件を試した。合図ありの場合、リーダーの「1, 2, 3…」という声の合図の後に動作開始し、フォロアーが追従できるようにする。合図なしの場合は、聴覚からの情報を遮断するため、フォロアーのみヘッドホンで音楽を聴きながら実験を行った。

さらに、1つの目標位置までの動作を順序どおり5回ずつ繰り返した場合、フォロアーはリーダーの動作を予測してしまうため、4つの目標位置をランダムに変え、フォロアーには目標位置を知らせない (Unknown) 実験も行い、目標位置を知らせる場合 (Known) と比較した。フォロアーに目標位置を知らせない場合、それぞれの目標位置が合計5回となるように、合計20回のうちで4つの目標位置をランダムに変え、リーダーのみ知っているようにした。実験条件はTable. 3に示すようにA, B, C, Dの4種類となる。



Fig. 3 Human-human cooperative task at the experiment

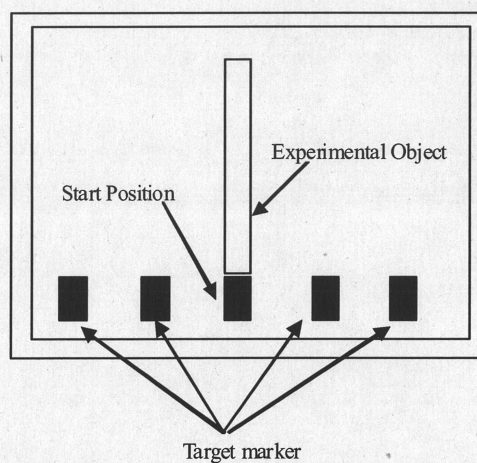


Fig. 4 Marker in the monitor (Left/Right)

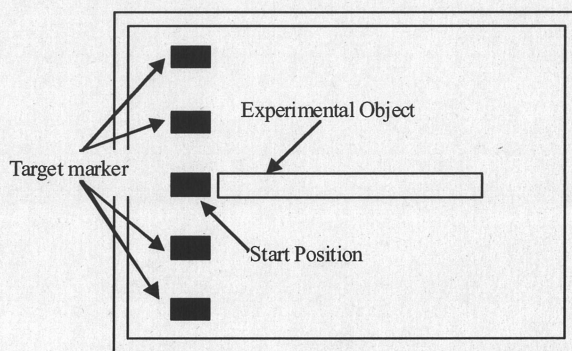


Fig. 5 Marker in the monitor (Up/Down)

Table.2 Targets on the monitor

| Direction | Distance |
|------------|----------|
| Left/Up | Long |
| Left/Up | Short |
| Right/Down | Long |
| Right/Down | Short |

Table.3 Experimental conditions

| Condition | Information provided for the follower | |
|-----------|---------------------------------------|-----------------|
| | Audio signal | Target position |
| A | No audio signal | Unknown |
| B | Audio signal given | Unknown |
| C | No audio signal | Known |
| D | Audio signal given | Known |

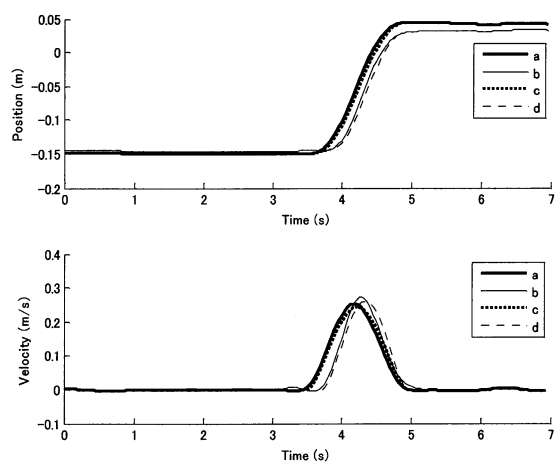
2.4 実験結果と考察

2.4.1 協調動作の変位・速度波形

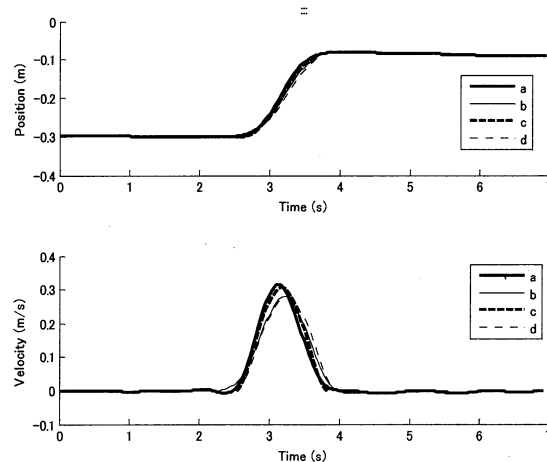
Fig. 6 に実際の実験で得られた変位、速度の波形の一例を示す。Fig. 6 (a) は、リーダーの合図がない場合、Fig. 6 (b) は合図がある場合の協調動作の変位、速度波形を示す。また、Fig. 6 (c), (d) はリーダーとフォロアーの協調に失敗して、動作が大きく乱れた場合の波形を示す。上側のグラフの縦軸は物体の変位、下側のグラフの縦軸は速度を示し、横軸はいずれも時間を示している。それぞれのグラフで、実際に得られた波形と理想的な動作である躍度最小軌道の波形を示している。速度は変位を微分することによって得ている。図中の凡例のa, b, c, dはそれぞれ、(a) リーダーの実際の動作の波形、(b) フォロアーの実際の動作の波形、(c) リーダーの躍度最小軌道の波形、(d) フォロアーの躍度最小軌道の波形を示している。なお、グラフの曲線は、実験で得られたデータの高周波成分をローパスフィルタによりカットした波形を載せている。

Fig. 6 (a) において、図中の細線がフォロアーを示しており、フォロアーはリーダーに遅れて反応していることが確認できる。これは、リーダーの合図がない条件の実験結果であるので、フォロアーには開始の合図がなく、モニターで物体が動き出すのを見ることしかできないため、リーダーとフォロアーの動作開始にはずれが生じた。合図がない条件では、多くの場合この特徴がみられた。しかし、必ず動作開始にずれが生じるわけではなく、リーダーが物体にトルクを加えて動作させた場合、ずれは生じなくなる。リーダーの合図がある場合は、フォロアーが遅れることもあるが、多くの場合 Fig. 6 (b) のようにリーダーフォロアーがほぼ同時に動作を開始することができた。

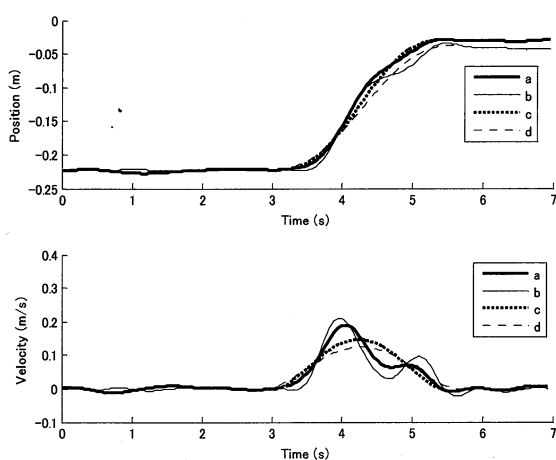
Fig. 6 (c) のように、協調に失敗した場合、リーダー、フォロアー両方とも動作が乱れている。これは、フォロアーが追従できていないこともあるが、リーダーがフォロアーに合わせようとしてフィードバックし、動作が乱れていることがグラフの波形からわかる。Fig. 6 (d) では、リーダーは動作の後半の速度が落ち、やや動作が乱れている。フォロアーだけでなくリーダーもフィードバック動作をすることがあり、人間はフィードバック動作をするとスムーズな動作ができないことがわかる。



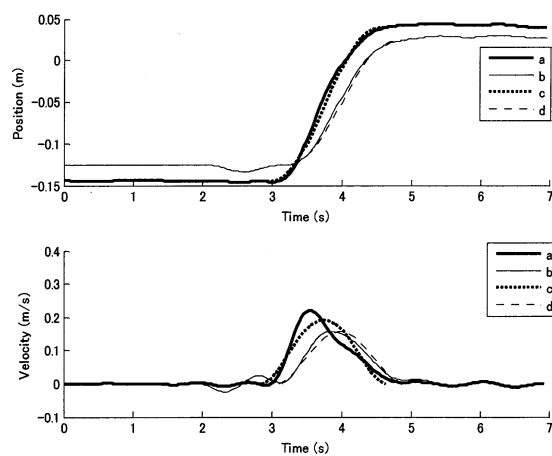
(a) No audio signal



(b) Audio signal given



(c) Unsmooth cooperative task (1)



(d) Unsmooth cooperative task (2)

Fig.6 Position and velocity profiles of cooperative task

2.4.2 躍度最小モデルによる動作のなめらかさ評価

Fig. 7 に上下方向の協調運搬実験時の躍度の2乗積分値の平均値をリーダー、フォロアー、物体の重心の別にまとめた結果を示す。Fig. 8 は、Fig. 7 と同様に ER 値の平均をまとめた結果を示している。Fig. 9, 10 は、左右方向での躍度の2乗積分値、ER 値の平均をまとめた結果を示す。グラフ中の凡例の A, B, C, D はそれぞれ Table. 3 に示す実験条件に相当する。グラフ内で4つの目標位置ごとに結果をまとめている。グラフの括弧内の数字は平均化した際に使用したデータ数を示している。Fig. 11-14 は、フォロアーが目標位置を知っている場合 (C, D) と知らない場合 (A, B) にまとめた上下・左右方向の躍度の2乗積分値と ER 値の結果である。また、Fig. 15-18 は、リーダーの合図がある場合 (B, D) とない場合 (A, C) にまとめた結果である。

Fig. 7-10、Fig. 11-14より上下、左右方向とも、フォロアーが目標位置を知っている場合 (Fig. 7-10 では条件 C, D) と知らない場合 (Fig. 7-10 では条件 A, B) を比較すると、知っている場合の条件 C と D では ER 値と躍度の2乗積分値がともに小さく、なめらかな動作を行っていることがわかった。このことより、人間は先の動作を予測できる方がなめらかな協調動作を行える。

フォロアーが目標位置を知っている場合、リーダー、フォロアーともに、目標位置までの軌道をあらかじめ生成して動作しているのでスムーズに協調できると考えられる。この場合、動作開始のタイミングを合わせた後、被験者2人ともそれぞれに生成した速度軌道をもとに動作しているのであり、フォロアーはリーダーに追従して動作を決定しているのではないと考える。また、動作距離の長短に応じた人間にとって自然な速度もある程度決まっているものと考えられる。フォロアーが目標位置を知らない場合は、動作開始直後に目標位置を推定し、速度軌道を生成して動作しているものと考えられる。フォロアーは協調動作中にはリーダーの軌道を見てフィードバックして良好な協調動作ができるものと予想していた。しかし、実験結果を見ると、先の動作を予測してフィードフォワードする方が良好な協調動作ができるという結果が得られた。前節の協調に失敗した例の速度波形の考察からも同様のことがわかる。

目標位置を比較すると、上下、左右方向とも動作距離が長い方 (各グラフの Long) が、躍度の2乗積分値、ER 値が大きく、動作が乱れていることがわかった。動作距離

が長い場合、フォロアーが予測していた軌道から外れる量が大きいためだと考えられる。

リーダーの動作開始の合図がある場合 (Fig. 7-10 では条件 A, C) とない場合 (Fig. 7-10 では条件 B, D) を比較すると、合図がない場合には動作が乱れて、躍度の2乗積分値とER値が大きくなると予想された。しかし、Fig. 7, 8, Fig. 15, 16より、上下方向では、予想とは逆に合図がある条件のほうが躍度の2乗積分値、ER値ともに大きい値となり、動作が乱れていることが分かった。Fig. 9, 10, Fig. 17, 18 より、左右方向では、値にばらつきがあり、リーダーの合図による影響は確認できなかった。合図がある場合は必ずしも動作しやすいといえないことがわかった。これは、リーダーの合図がある場合、フォロアーは合図とモニターに表示される物体の動きの視覚と聴覚の両方を意識しなければならないためだと推測する。

上下方向 (Fig. 7-8) と左右方向 (Fig. 9-10) を比較すると、躍度の2乗積分値、ER値ともに左右方向では全体的に小さい値となった。これは、上下方向では、重力の影響があるためだと考えられる。物体を保持するためには、常に一定の力が必要である。左右方向の動作では、垂直方向には一定の力を加え、左右方向に動作の加減速のためにわずかに力を加えて腕を動かすが、上下方向の動作の場合、垂直方向に物体保持の力に加え、動作のための微妙な力の調節が必要であり、動作にぶれが生じるものと考えられる。

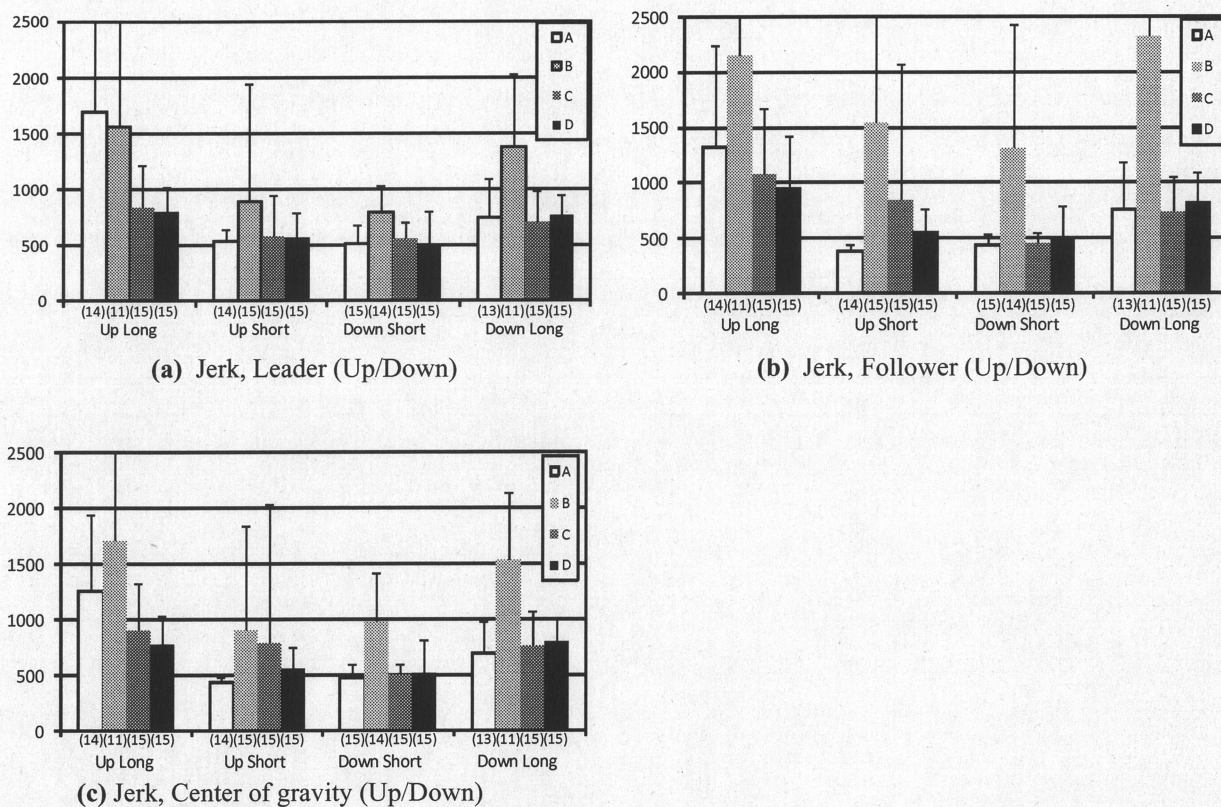


Fig.7 Jerk value (Up/Down)

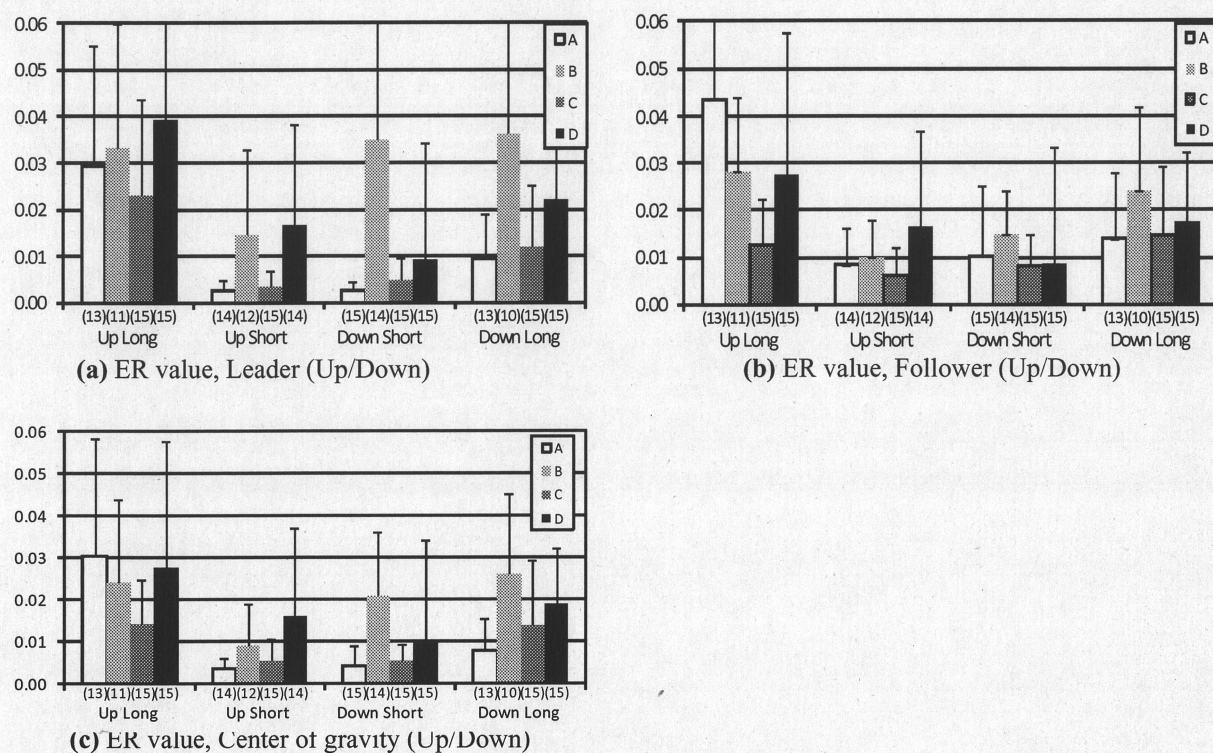


Fig.8 ER value (Up/Down)

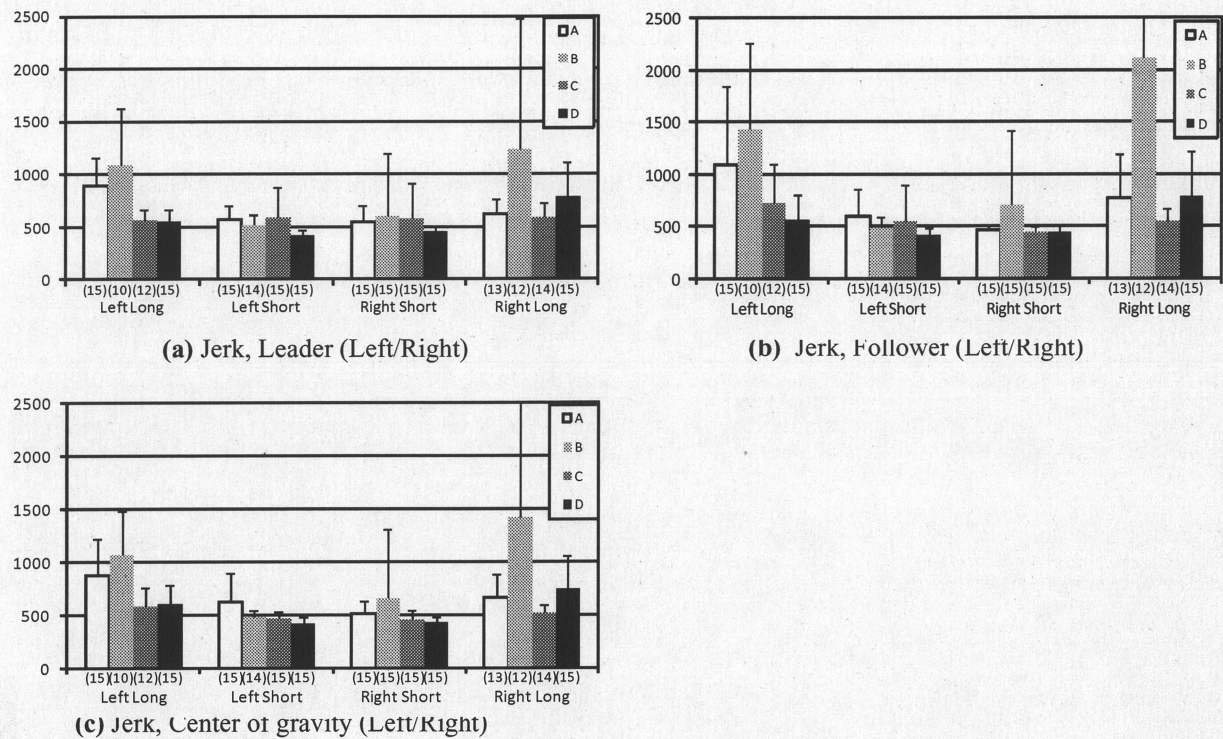


Fig.9 Jerk value (Left/Right)

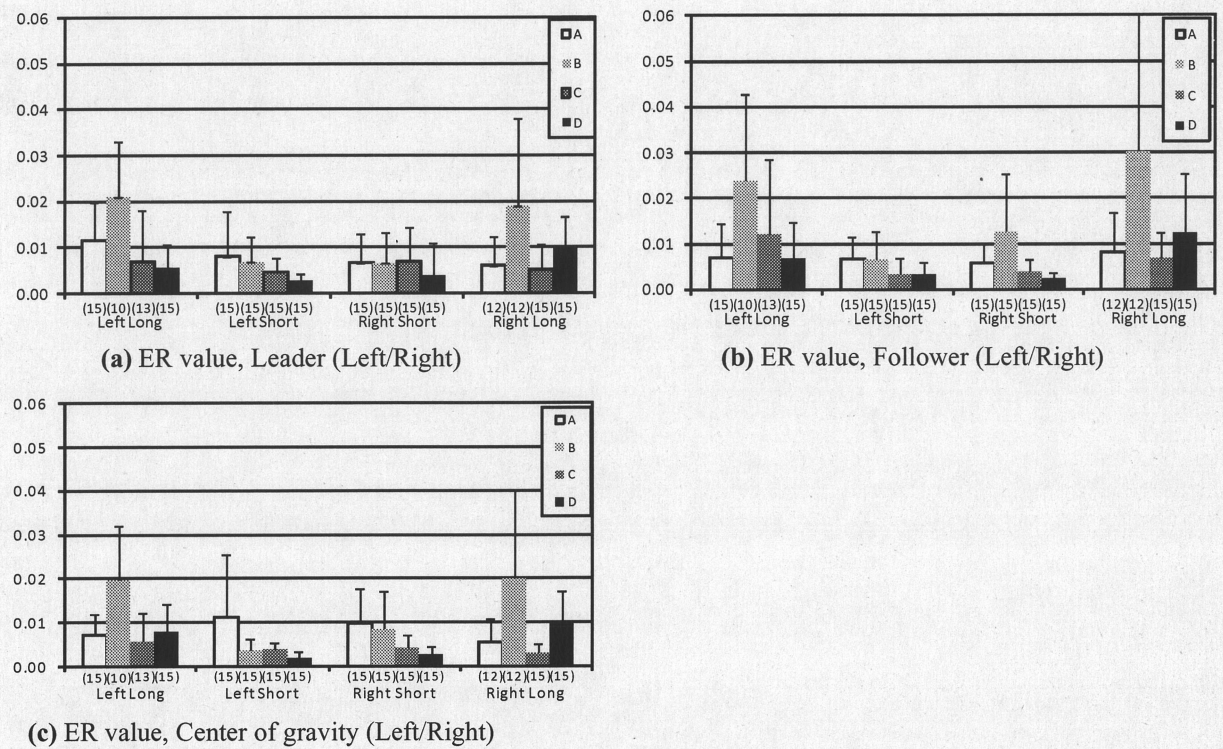
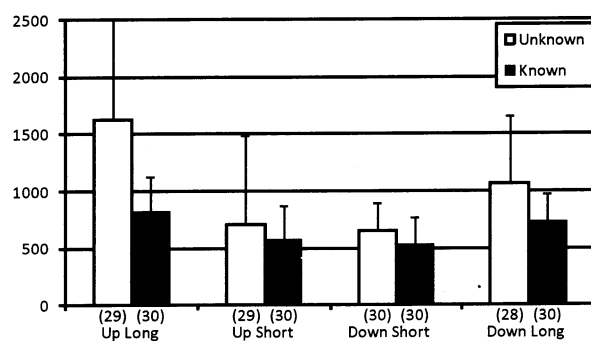
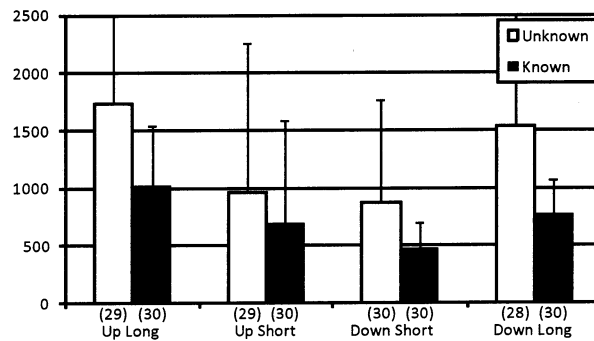


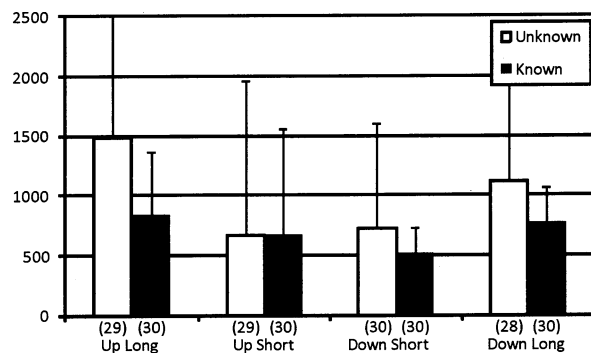
Fig.10 ER value (Left/Right)



(a) Jerk, Leader (Up/Down)

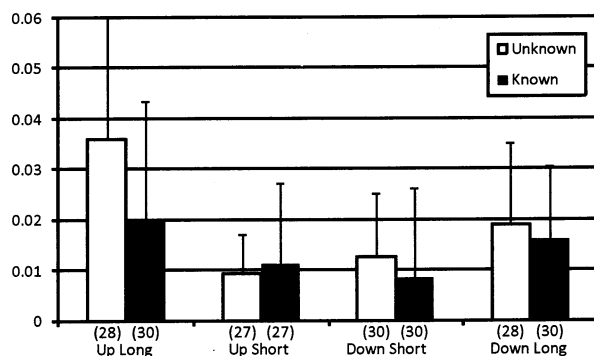


(b) Jerk, Follower (Up/Down)

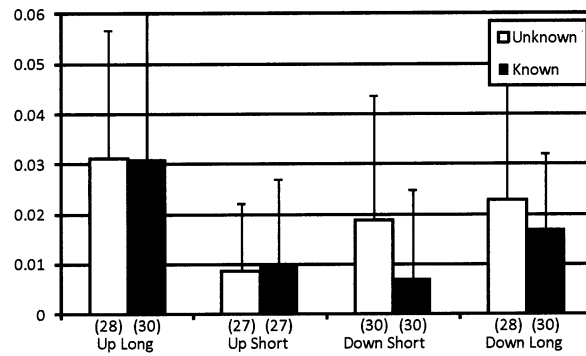


(c) Jerk, Center of gravity (Up/Down)

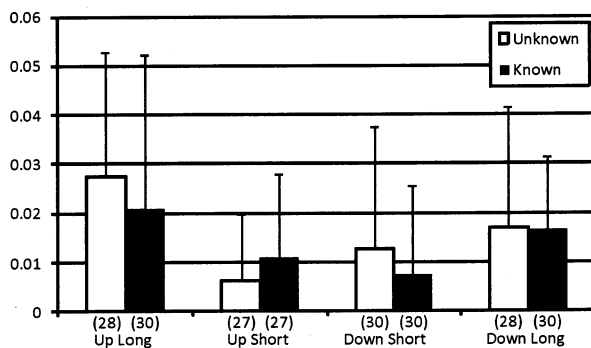
Fig. 11 Jerk value (Up/Down) comparison of "Known" and "Unknown"



(a) ER value, Leader (Up/Down)



(b) ER value, Follower (Up/Down)



(c) ER value, Center of gravity (Up/Down)

Fig.12 ER value (Up/Down) comparison of "Known" and "Unknown"

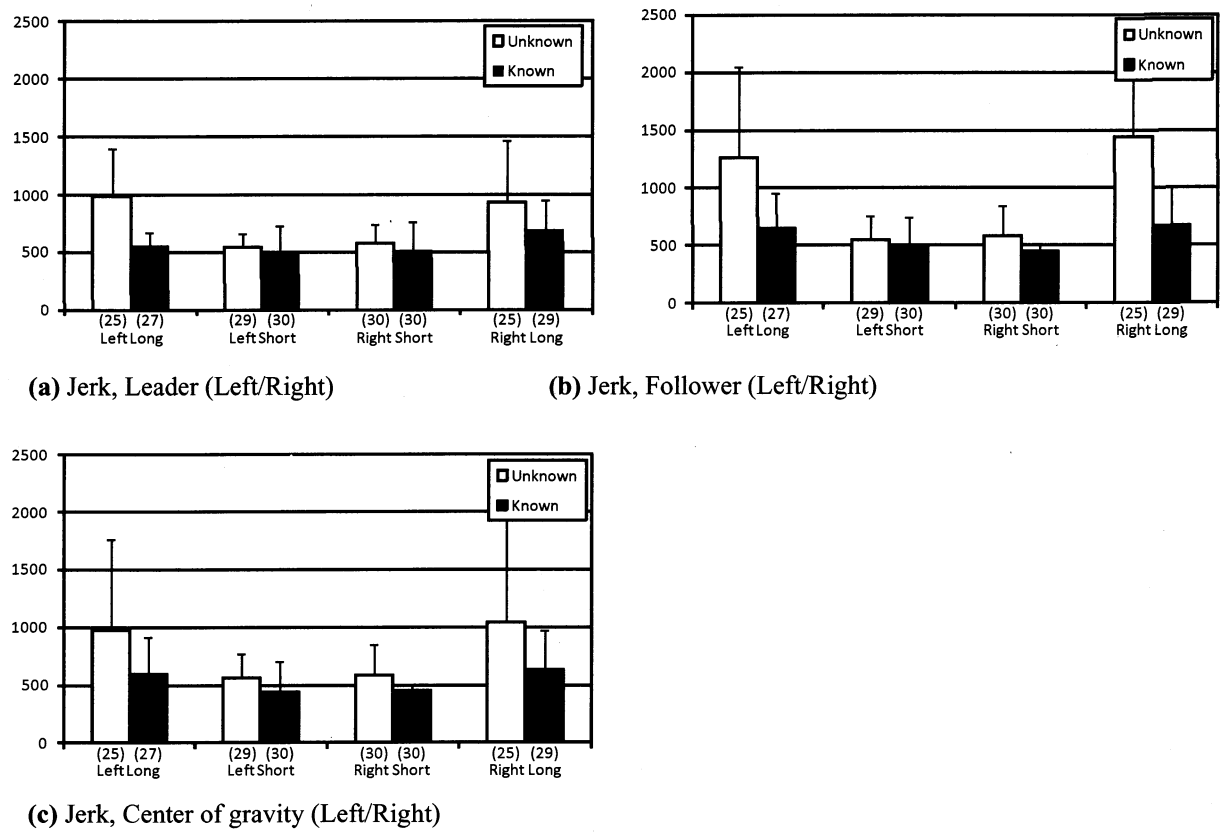


Fig.13 Jerk value (Left/Right) comparison of "Known" and "Unknown"

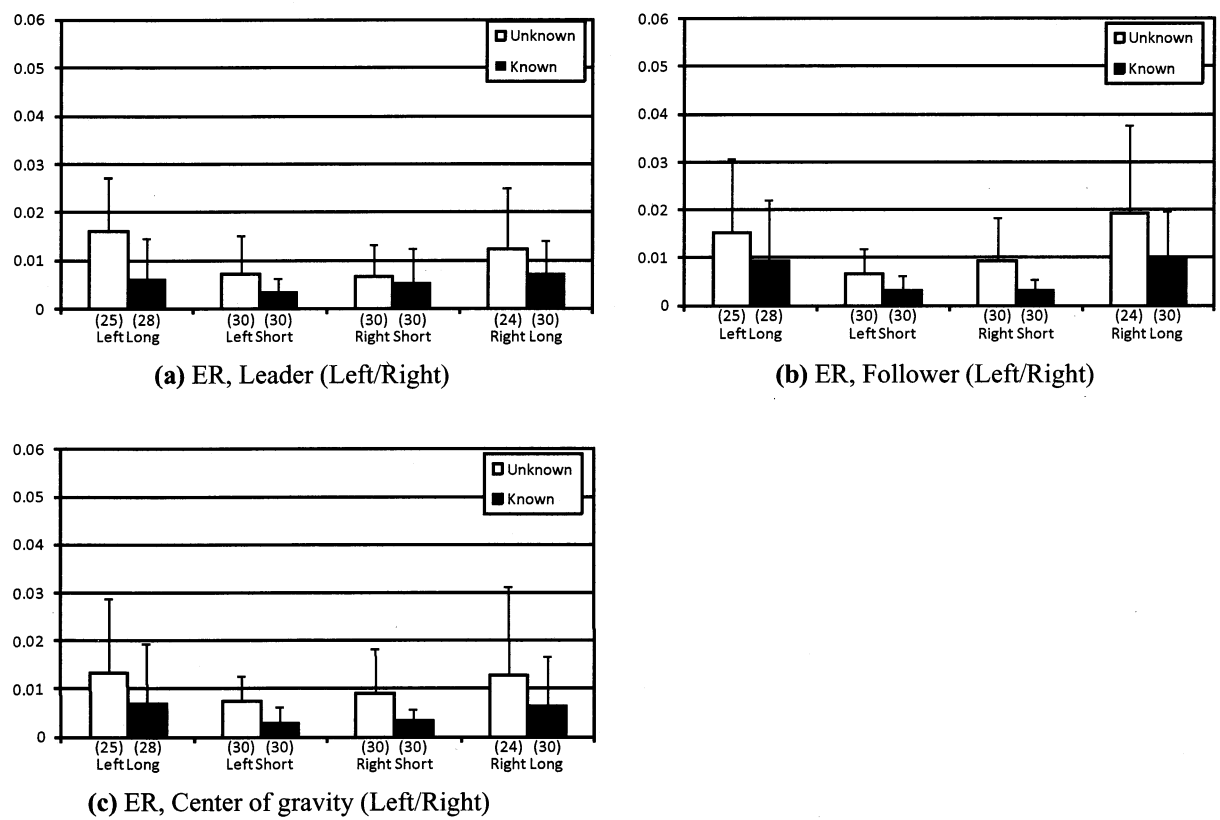


Fig.14 ER value (Left/Right) comparison of "Known" and "Unknown"

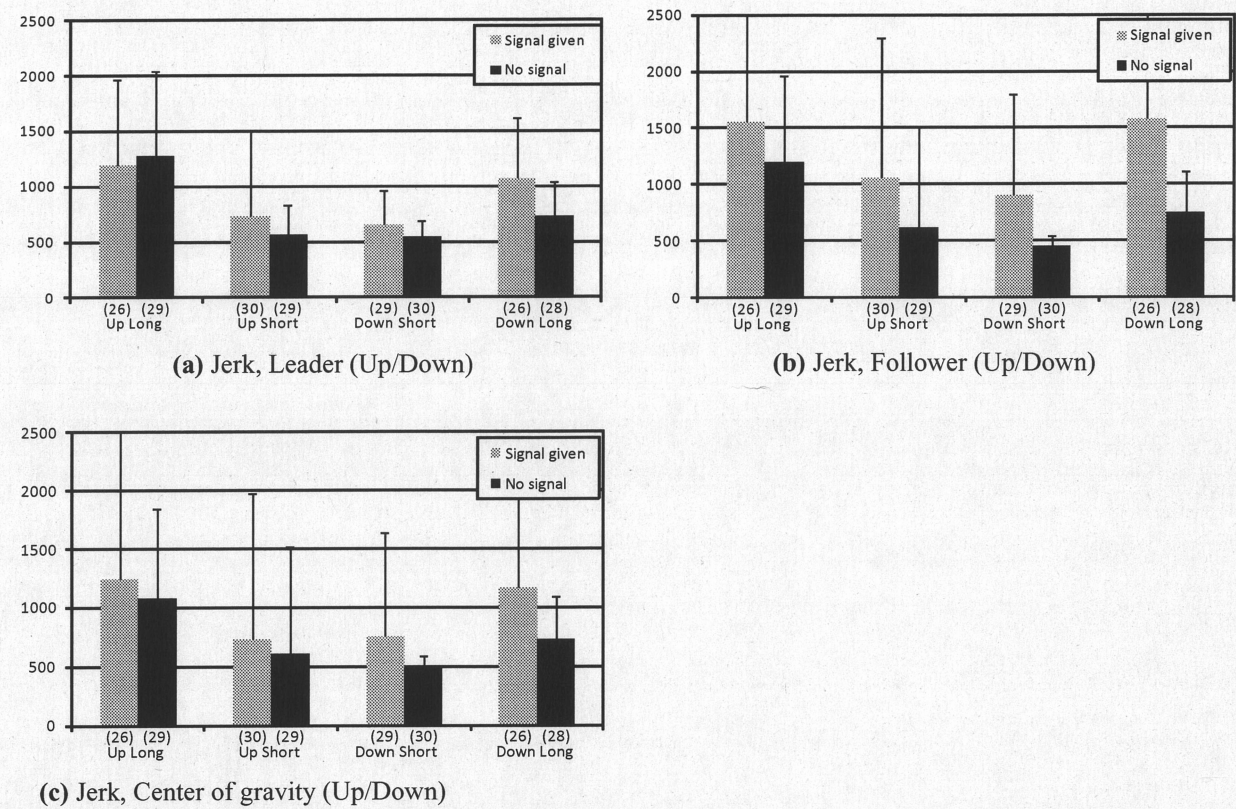


Fig.15 Jerk value (Up/Down) comparison of "Signal given" and "No signal"

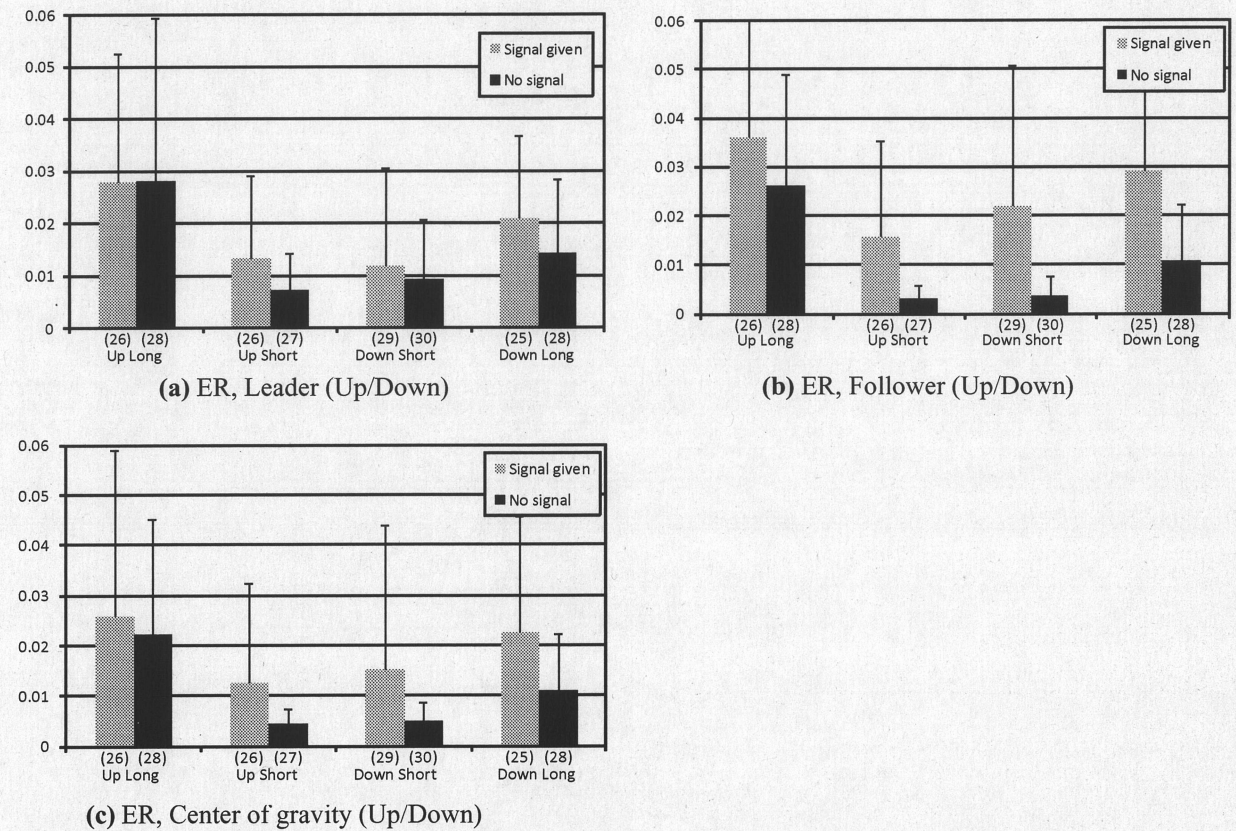


Fig.16 ER value (Up/Down) comparison of "Signal given" and "No signal"

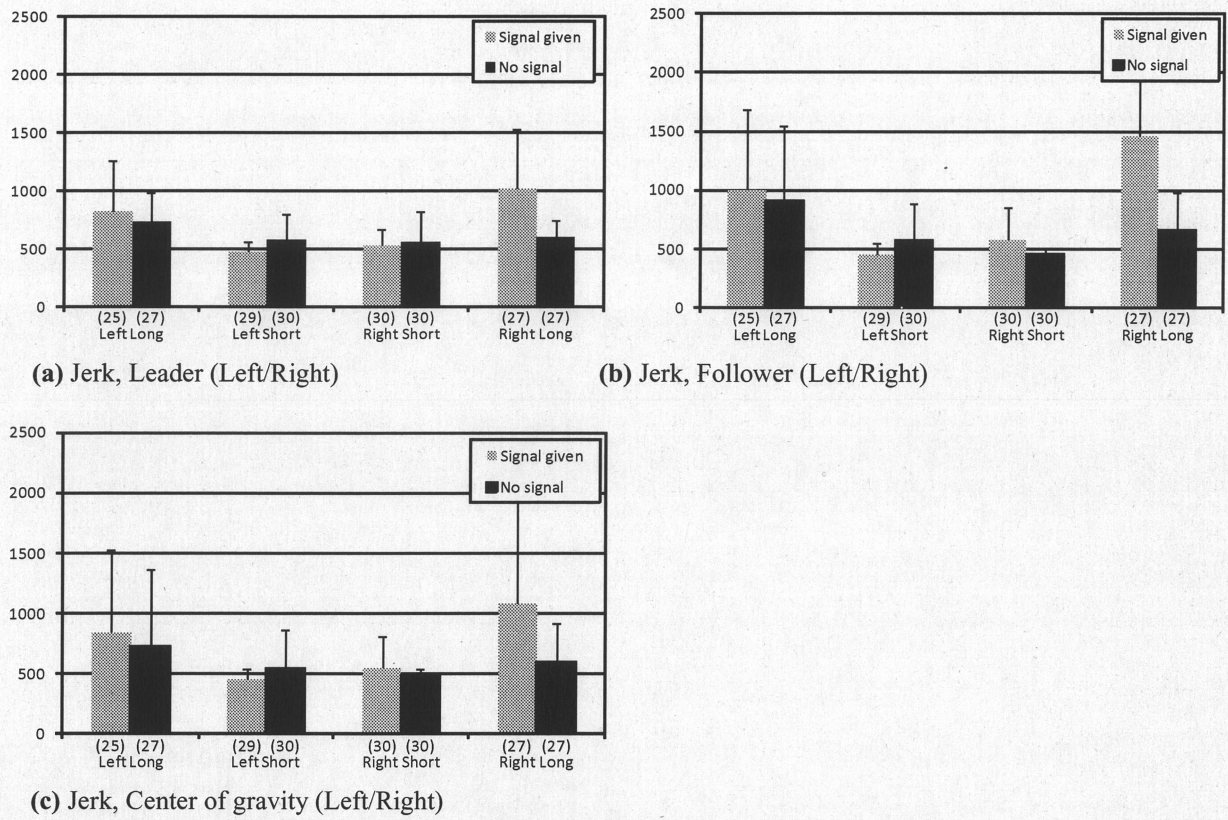


Fig.17 Jerk value (Left/Right) comparison of "Signal given" and "No signal"

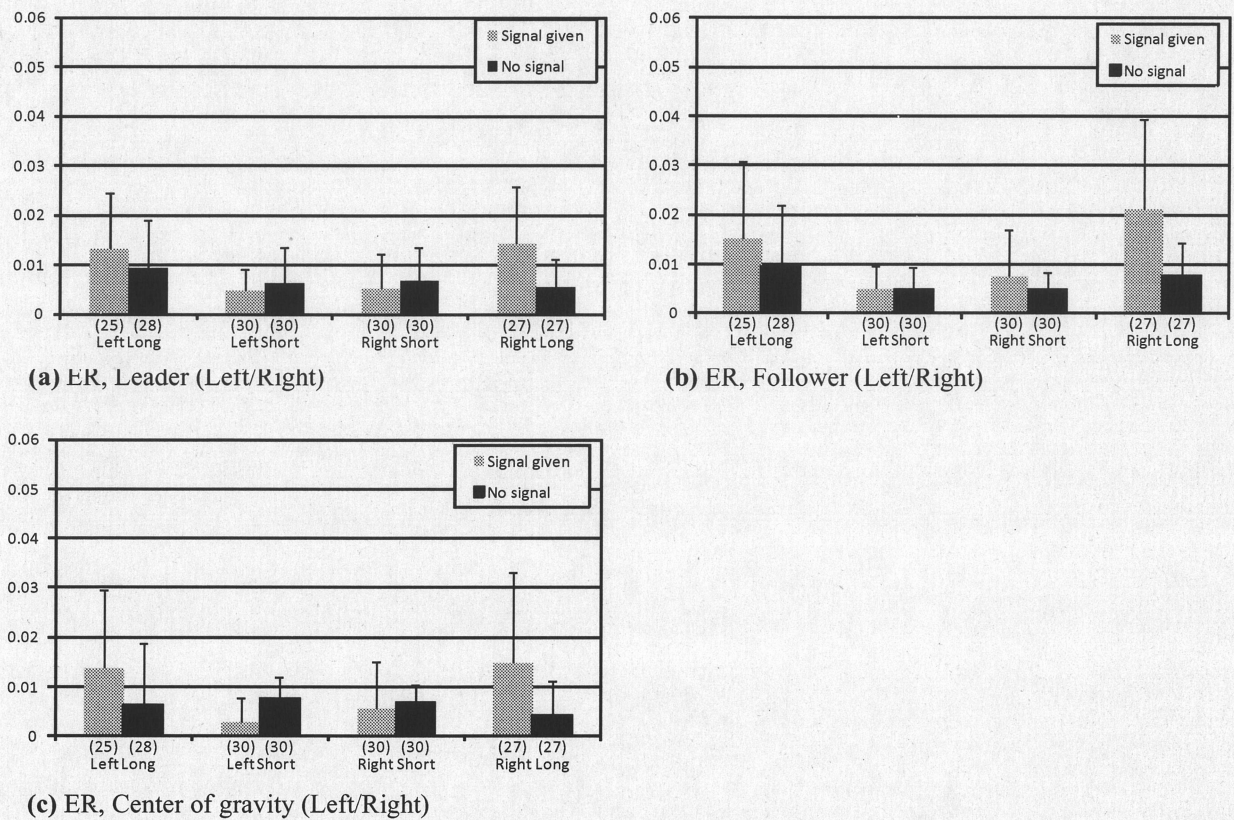


Fig.18 ER value (Left/Right) comparison of "Signal given" and "No signal"

2.4.3 動作中の物体の傾き角度評価

躍度の2乗積分値とER値は、リーダーとフォロアーの把持位置と物体の重心において個別に求めた。これらの評価指標は、リーダーとフォロアーの動きにずれが生じていても、それぞれがなめらかな動きをすると適切に評価できない。特に、リーダーの合図がある場合とない場合に、速度波形を見ると動作開始に遅れが生じたが、動作のなめらかさには影響が出なかった。そこで、物体の最大傾き角度、平均傾き角度を求めて協調動作を評価した。

Fig. 19は、上側のグラフは実際の動作で得られた変位[m]、下側のグラフは物体の傾き角度[deg]の波形の一例を示している。図中の凡例のa, bはそれぞれ、(a)リーダーの実際の動作の波形、(b)フォロアーの実際の動作の波形を示している。

Fig. 20は、上下方向の物体の傾き角度を示しており、(a)は動作中の最大傾き角度、(b)は平均傾き角度を示している。Fig. 21は、Fig. 20と同様に左右方向の実験における物体の傾き角度を示している。Fig. 22, 23は、フォロアーが目標位置を知っている場合(C, D)と知らない場合(A, B)にまとめた傾き角度のグラフであり、それぞれ上下方向、左右方向での結果を示している。Fig. 24, 25は、リーダーの合図がある場合(B, D)とない場合(A, C)にまとめた結果である。

Fig. 21, 23より左右方向は、最大傾き角度、平均傾き角度ともフォロアーが目標位置を知っている条件(C, D)で傾き角が小さかった。前節のなめらかさ評価と同様にフォロアーが目標位置を知っている場合、は、リーダー、フォロアーとも予想した軌道をもとに動作し、結果的に傾き角が小さい良好な協調動作ができているといえる。

しかし、Fig. 20, 22より上下方向の平均傾き角度のみ他のグラフと逆転するような結果となった。通常物体の傾きはFig. 19のようなピークを描くが、フォロアーが目標位置を知っている条件で最大傾き角度が小さく、平均傾き角度が大きいということは、次のような動作のいずれかであると考えられる。(1) 動作開始時点で傾いたまま動作し、動作中にピークを描き、終了時点でも開始時点と同程度に傾いている動作、(2) 動作開始時点ではほぼ水平で開始後傾きが増大し、終了時点まである傾き角のまま推移する動作、(3) その逆で、開始時点で傾いており、終了時点でほぼ水平になる動作。いずれの動作も物体が傾いているという認識が薄いことが原因だと考えられる。上下方向で

はフォロアーが目標位置を知っている条件において、重力の関係で物体の傾きを力覚でも認識できるので、モニターよりも力覚に頼ったのではないかと推測する。

Fig. 20, 21 と Fig. 24, 25 より、リーダーの合図がある場合とない場合を比較すると、上下、左右方向とも合図がない場合に最大傾き角度、平均傾き角度が大きい傾向が表れた。リーダーの合図がない場合、Fig. 6 で示したように、フォロアーは動作開始時に遅れが生じることにより物体が傾いたといえる。リーダーの合図がない場合、前節のなめらかさ評価では差がなかったが、傾き角には影響が出た。このことから、動作開始時にフォロアーの遅れが生じ物体が傾くが、協調動作に支障が出るほどではなく、動作開始後は合図がある場合と同様に協調動作を実現できたといえる。

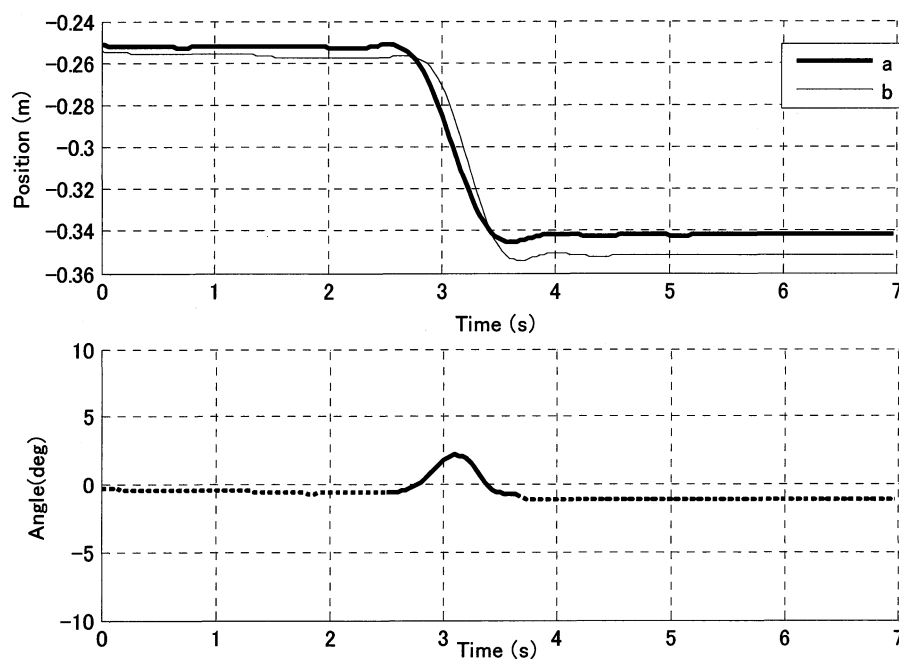


Fig.19 Position and angle profiles of cooperative task

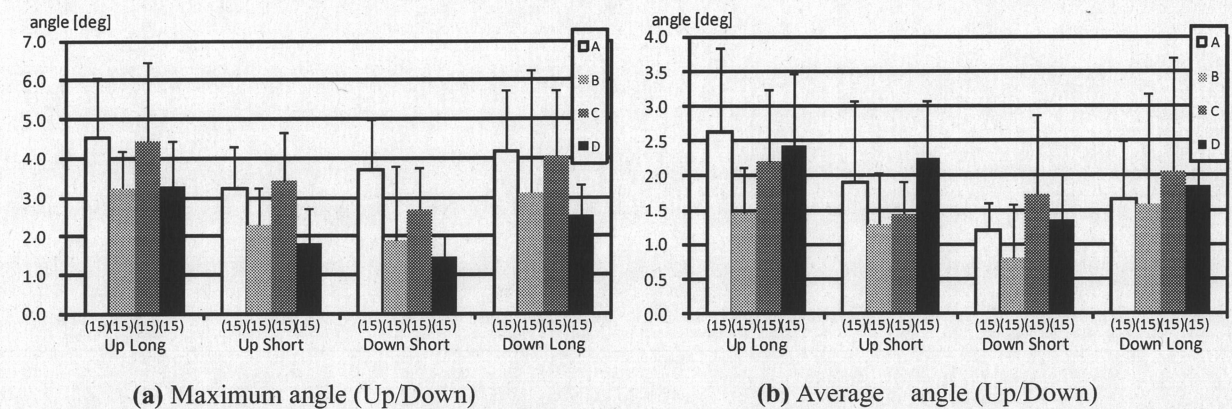


Fig.20 An angle of the object (Up/Down)

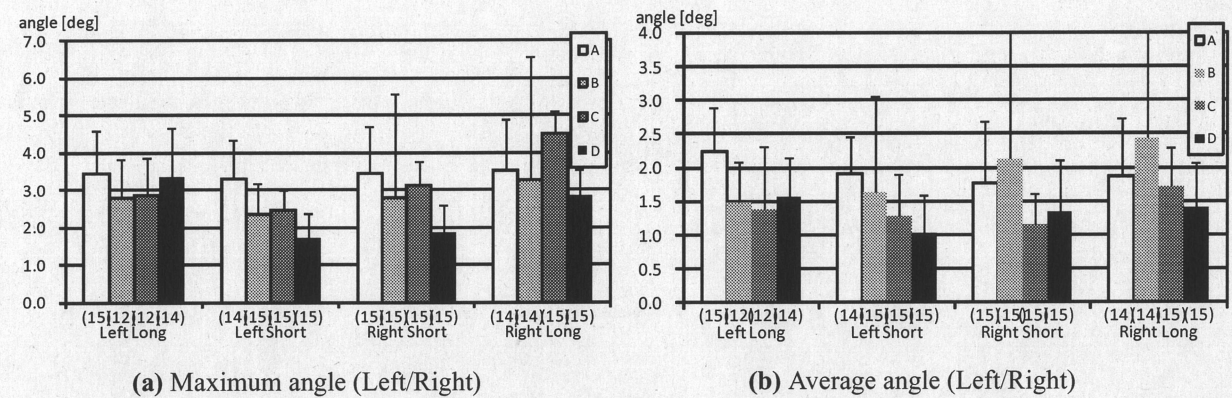


Fig.21 An angle of the object (Left/Right)

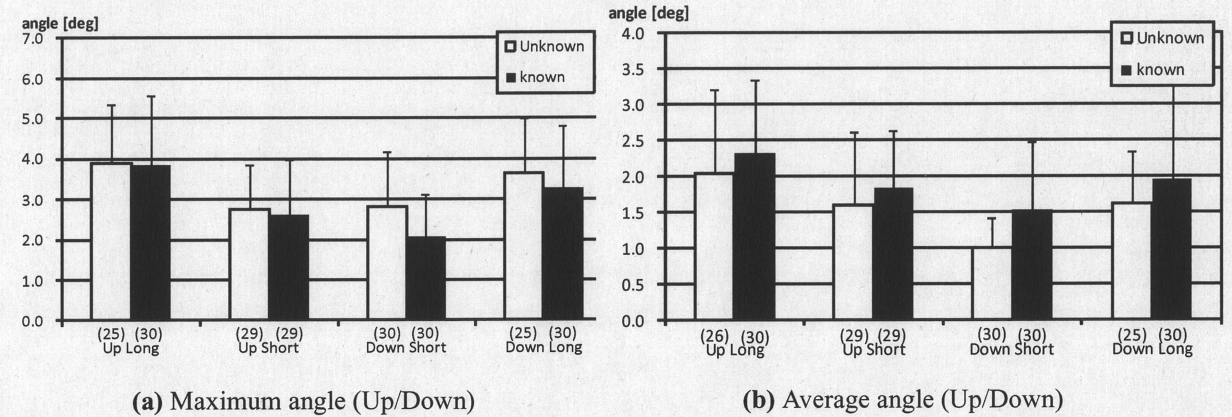


Fig.22 An angle of the object (Up/Down) comparison of "Unknown" and "Known"

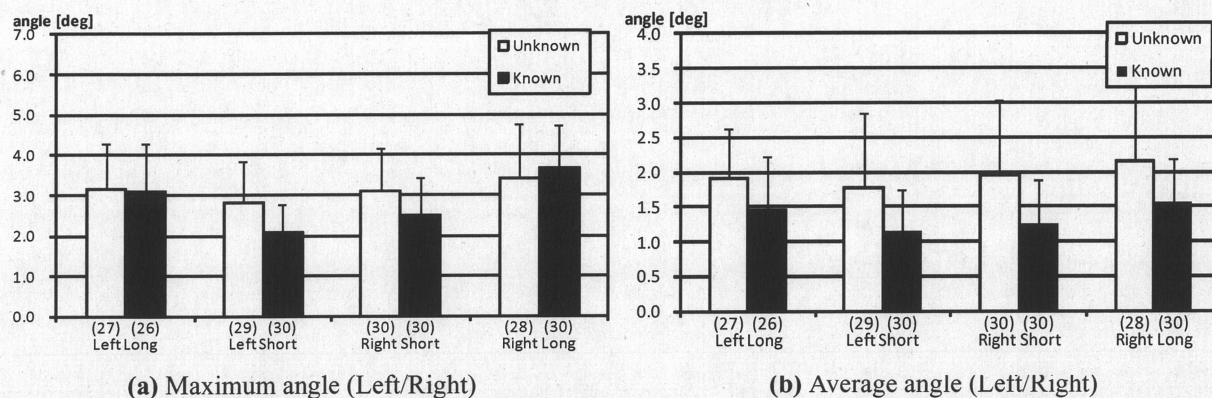


Fig.23 An angle of the object (Left/Right) comparison of "Unknown" and "Known"

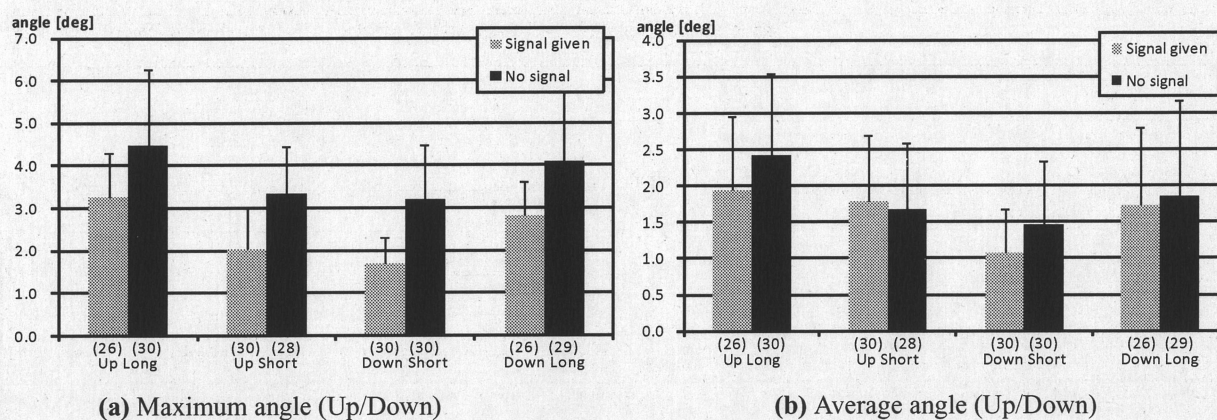


Fig.24 An angle of the object (Up/Down) comparison of "Signal given" and "No signal"

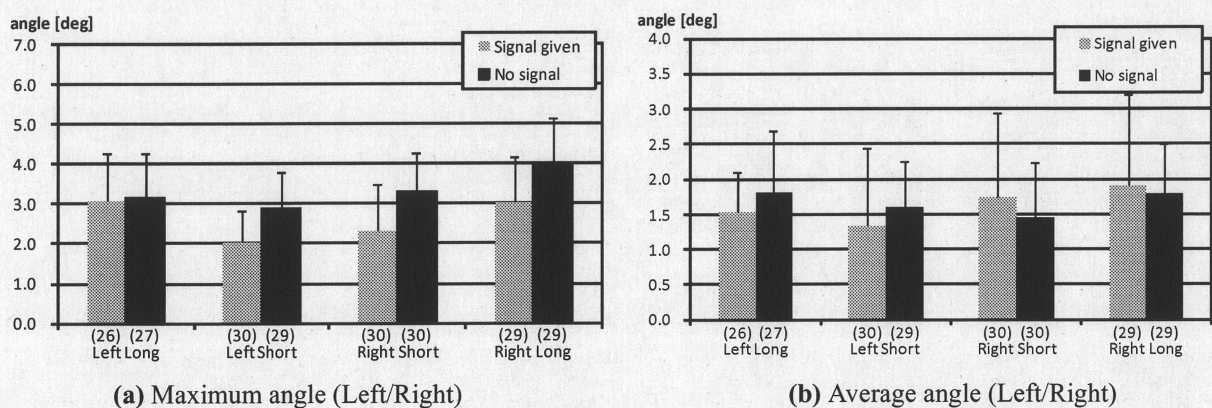


Fig.25 An angle of the object (Left/Right) comparison of "Signal given" and "No signal"

2.4.4 物体の重心の平均速度

本節では、物体の重心における協調動作中の平均速度を求めた。実験では、被験者には動作の速度を指示せず自然な速度で動作させており、このとき各条件での平均速度に特徴が表れるかを解析した。Fig. 26, 27 は協調動作の平均速度の値を目標位置、実験条件 (A, B, C, D) ごとに平均化した値をまとめたグラフであり、それぞれ上下方向と左右方向の結果である。

グラフから、フォロアーが目標位置を知っている場合 (C, D)、知らない場合 (A, B) と比較すると、平均速度が大きいことがわかる。これは、フォロアーが目標位置を知らない場合、動作開始の直後に動作距離の長短を判断する必要がある。また、人間の反射能力には限界があり、速いサイクルでフィードバックすることができない。そのため、できるだけフィードバックせずに動作するが、フォロアーが動作中に物体が傾いたと判断してからフィードバックして対応することもできるように自然に速度を落としていると考えられる。フォロアーの速度が遅い場合、リーダーもフィードバックをすることもあり、速度を下げることもあると考えられる。

動作距離の長短を比較すると、動作距離が長い場合、速度が大きいことがわかる。動作距離は、長い場合 (0.2m) は、短い場合 (0.1m) の2倍に設定している。しかしグラフより、動作距離が長い場合の平均速度は、短い場合のそれと比較して約 1.5 倍程度であることがわかった。このことから、平均速度は動作距離と線形に比例しているのではないといえる。人間どうしが協調動作をするにあたり、動作距離に応じた動作速度がある程度定まるのではないかと考えられる。

躍度の2乗積分値、ER 値と同様に、平均速度のリーダーの合図ある場合 (B, D) とならない場合 (A, C) を比較した場合は、条件によるはっきりとした特徴は見られなかった。合図がない場合でも、一度動作を開始すれば、合図がある場合と条件はほぼ同じであると考えられる。

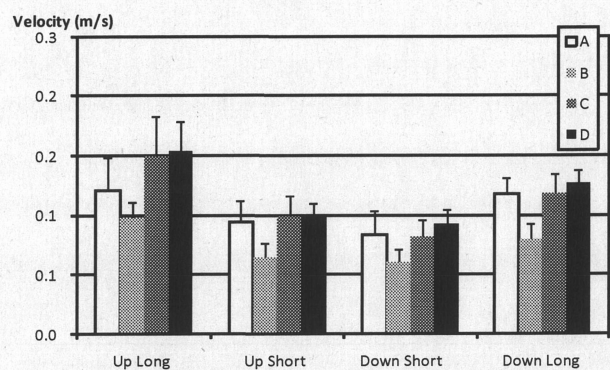


Fig.26 Average velocity (Up/Down)

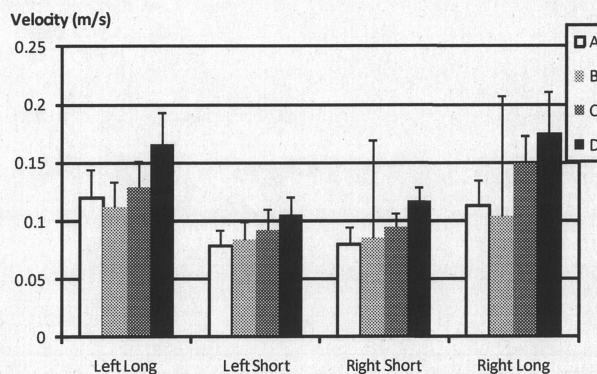


Fig.27 Average velocity (Left/Right)

2.5 本章のまとめ

本章では、人間どうしの上下・左右方向の協調物体運搬動作の実験において、フォロアーへの目標位置の告知の有無、リーダーの動作開始の合図の有無による影響を調べた。躍度最小モデルによるなめらかさ評価、物体の傾き角度、物体の重心の平均速度を解析し、結果を考察した。

フォロアーへ目標位置を知らせない場合、躍度が大きく、速度が遅くなった。この条件では、フォロアーがフィードバックした動作をすることがあるため、速度が落ち、なめらかな動作とならないことが分かった。人間は先の動作を予測し、動作距離に応じた速度軌道をあらかじめ生成すると、すなわちフィードフォワードすると良好な協調動作を実現していると考えられる。

リーダーの動作開始の合図がない場合、傾き角が大きくなり、合図がないことによるフォロアーの動作開始の遅れが影響していることがわかった。しかし、動作のなめらかさと平均速度には特徴がみられなかった。フォロアーの遅れによる動作開始に多少ずれがあっても、協調動作に支障が出るほどではなく、フォロアーの予測した軌道がリーダーの軌道に一致していれば、合図がある場合と同様に協調動作を実現できるといえる。

第3章

モニター上の目印位置を変更した実験

前章の実験では、フォロアーが目標位置を知っている場合と知らない場合、リーダーの合図がある場合とない場合の条件 (Table. 3 の条件 A, B, C, D) について考察した。本章での実験は、この条件に目標位置を示すモニター上の目印の位置を変更した条件を追加した。追加した条件は目印を、物体を示すモニター上の長方形の端につける場合と中心につける場合の2通りである。人間どうしの協調動作において、人間が動作を実現するための情報として、目標位置の変更による協調動作への影響を調べた。

実験装置は、前章の実験と同様である。前章と同様に協調動作のなめらかさ、動作中の物体の傾き、動作速度を評価し、目印の位置による影響を比較した。

3.1 実験条件、目的

前章の実験では、モニター上の目標位置を示す目印を、物体を示すモニター上の長方形の端 (Edge) に貼り付けていたが、今回の実験では目印を長方形の中心 (Center) に貼り付ける条件を追加した。Fig. 28は物体を示す長方形の端に付けた場合、Fig. 29は中心に付けた場合のモニターの表示例を示す。それぞれの目印の位置の条件において、前章と同様に Table. 3 の実験条件 A, B, C, D を設定した。

目印を物体の端に付ける場合は、被験者それぞれが把持している側に目印をつけるが、中心に目印を付ける場合はリーダー、フォロアーともに同じ目標位置となる。目印が物体の端にある場合で、特にフォロアーが目標位置を知っている場合は、動作開始タイミングを合わせれば、被験者それぞれが目印にあわせるだけで本来の協調をせずに動作が実現してしまうと考えられる。このとき、物体が傾いてもなめらかな動作

をする可能性がある。目印が中心にある場合は、フォロアーは物体の傾きが小さくなるように調整しなければ物体の中心を目印に合わせることができない。フォロアーが調整して動作することにより、目印が中心にある場合の方が、動作が乱れるのではないかと予想された。

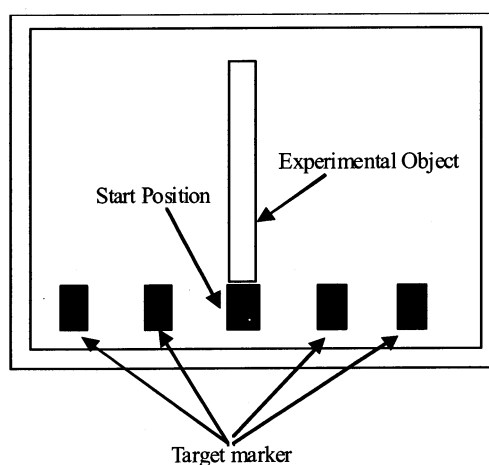


Fig.28 Marker at edge of the object in the monitor

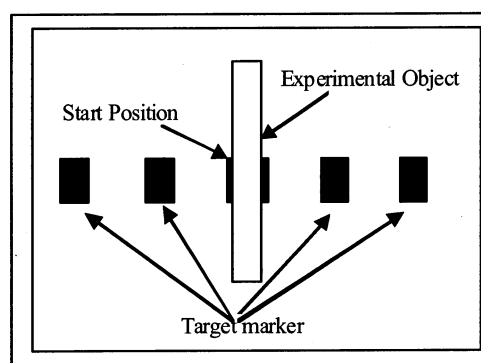


Fig.29 Marker at center of the object in the monitor

3.2 実験方法

今回の実験では、動作距離が長い場合を 0.30m、短い場合を 0.15m とし、モニターに目印を貼り付けた。実験装置は、前章の実験と同様の構成で、3次元位置センサを用いた。実験方法も同様に、被験者はリーダー（主導側）、フォロアー（追従側）に分かれて物体を協調運搬した。前章の実験において、左右方向では上下方向と比較して良好な協調動作ができたので、目印の位置による影響を調べやすくするため、今回は左右方向のみで実験を行った。

被験者は2人で2通りの被験者の組み合わせで実験を行った。今回は、精度向上のため、それぞれの目標位置で10回ずつ、合計40回行った。

3.3 実験結果と考察

3.3.1 躍度最小モデルによる動作のなめらかさの評価

Fig. 30-32 は、躍度の2乗積分値を、目印を中心に付けた場合と端に付けた場合を比較した結果を示している。Fig. 30-32 は、それぞれ物体の重心、リーダー、フォロアーの把持位置におけるグラフ群であり、各グラフで (a)(b)(c)(d) がそれぞれ4つの目標位置 (Left long, Left short, Right short, Right long) ごとの平均値、(e) は4つの目標位置での値をまとめて平均化したグラフである。Fig. 33-35 は、ER 値を、目印を中心に付けた場合と端に付けた場合を比較した結果であり、それぞれ物体の重心、リーダー、フォロアーの把持位置における結果を示している。

物体の重心、リーダー、フォロアーの把持位置における躍度の2乗積分値のグラフである Fig. 30-32 より、4つの目標位置での値をまとめたそれぞれのグラフの (e) に注目すると、フォロアーが目標位置を知らない条件 (A, B) において、目印を中心に付けた場合の方がやや躍度が大きく、動作が乱れる傾向がみられた。フォロアーが目標位置を知っている条件 (C, D) では、値にばらつきがあり差は小さかった。ER 値をまとめた Fig. 33-35 においても躍度の2乗積分値と同様の結果を得られた。フォロアーが目標位置を知らない条件 (A, B) で、目印が中心にある場合、フォロアーは動作開始の後、目標位置が長短どちらなのか判断しにくいため、動作中に速度を調整することがあり、フィードバックするために動作が乱れると考えられる。フォロアーが目標位置を知っている場合 (C, D) に大きな差がなかったことから、目印が中心にあっても端の場合と同じように目標位置をあらかじめ確認し、動作開始後は目表位置に合わせるだけで協調動作が実現できているといえる。

次に、実験条件 A, B, C, D を比較すると、躍度の2乗積分値、ER 値ともにフォロアーが目標位置を知っている場合は値が小さく、なめらかな協調動作が実現しており、前章の実験と同様の特徴を再確認することができた。

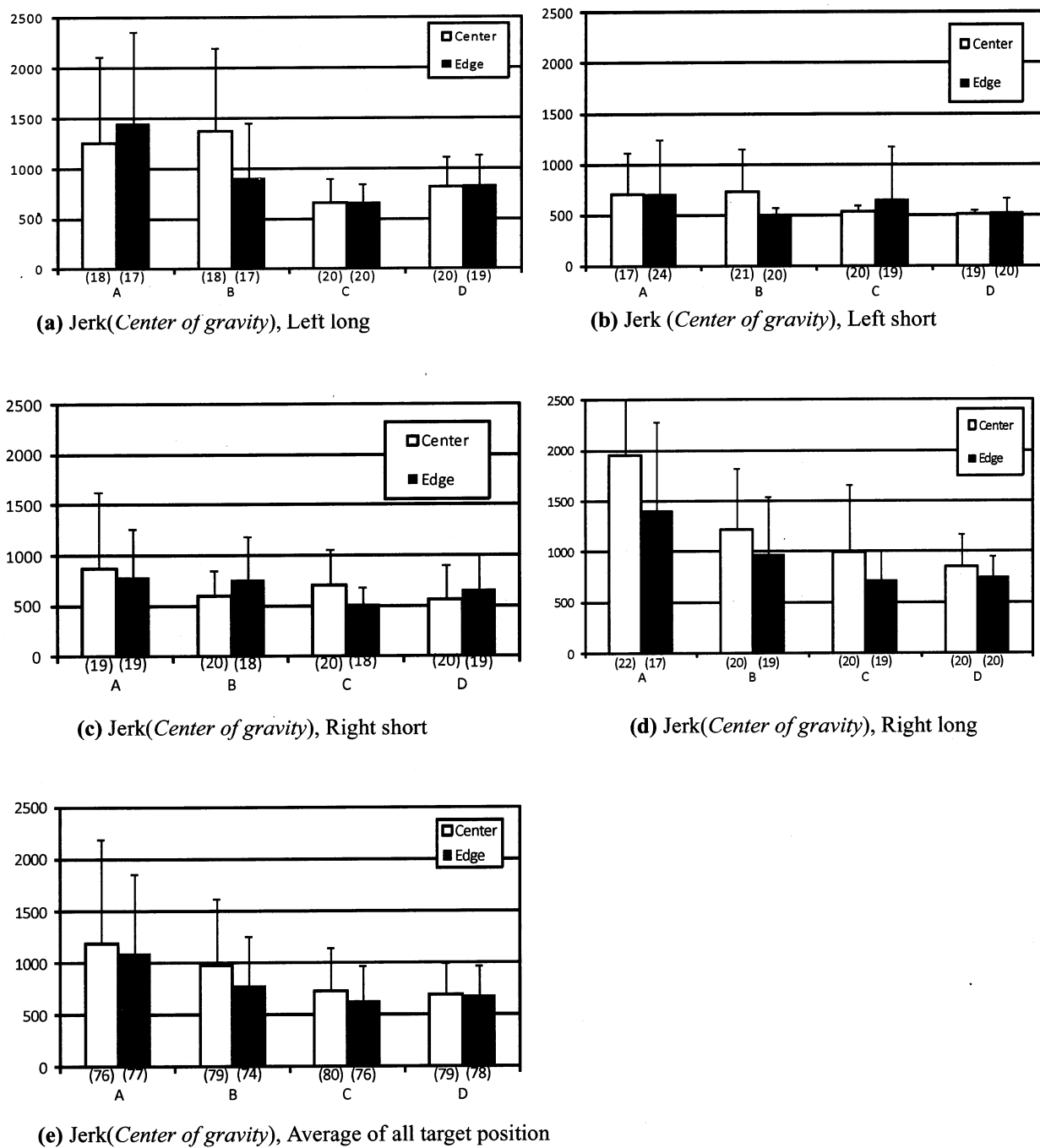


Fig.30 Jerk Value (Center of gravity) comparison of marker "Center" and "Edge"

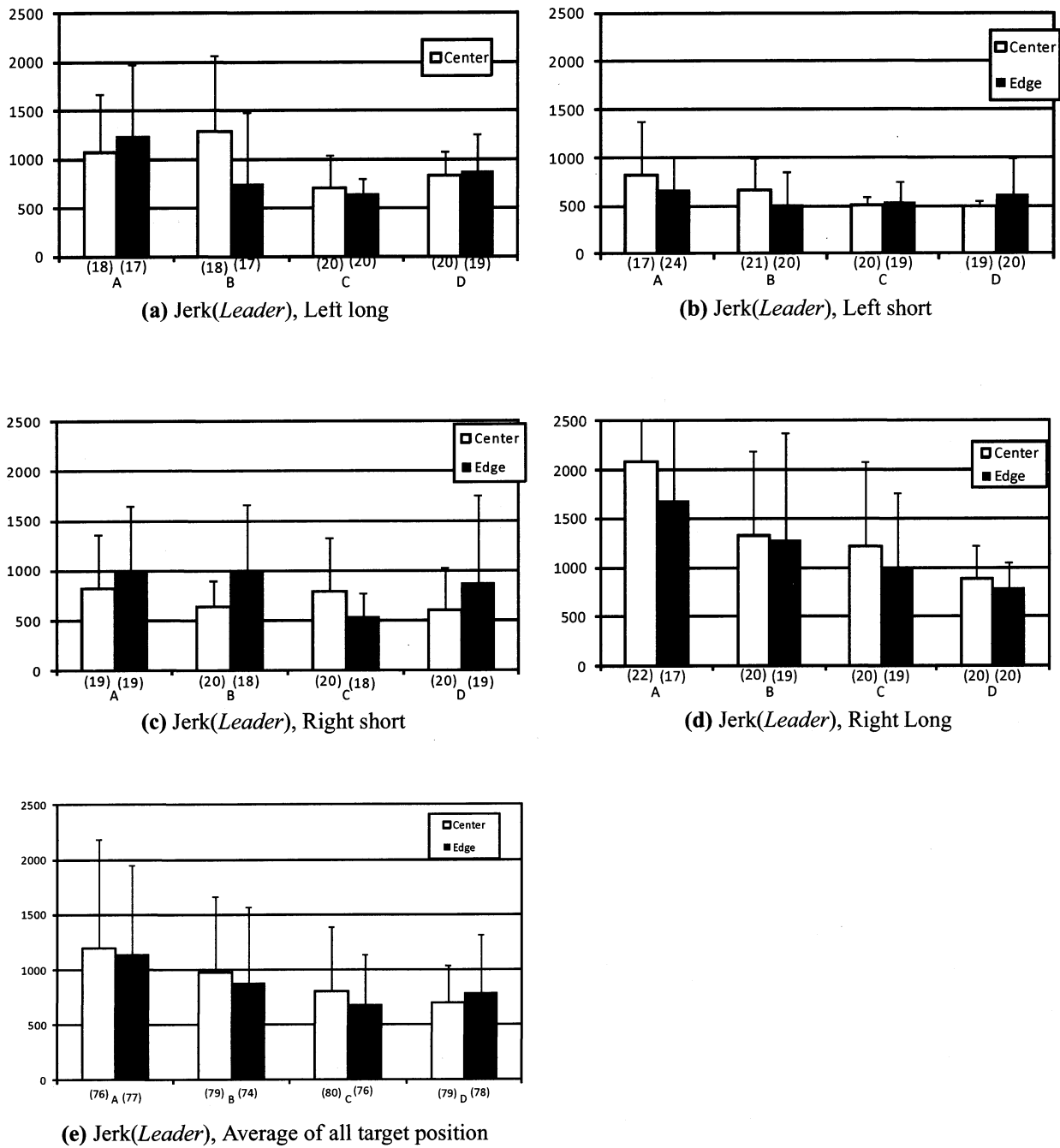
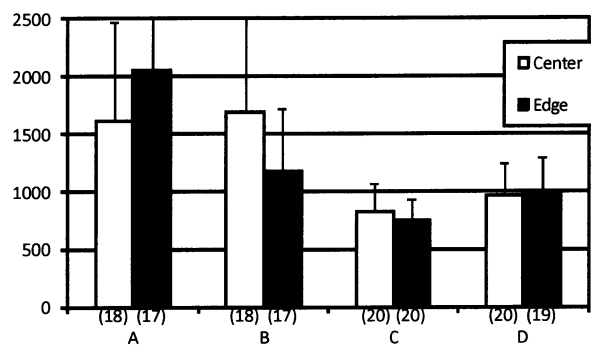
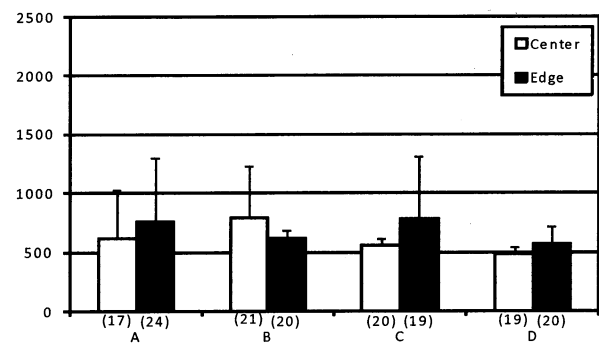
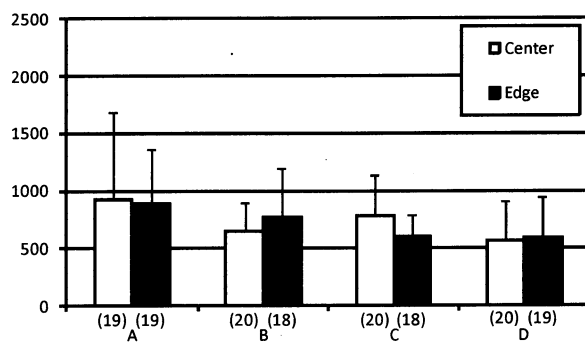
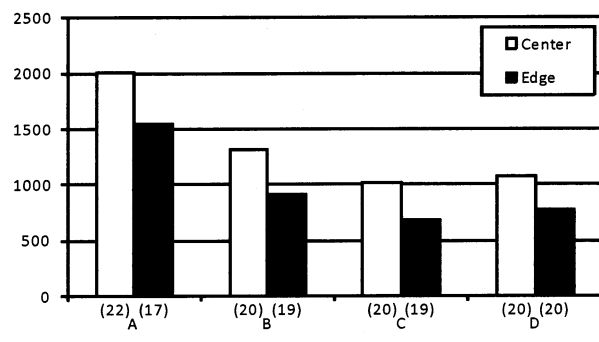
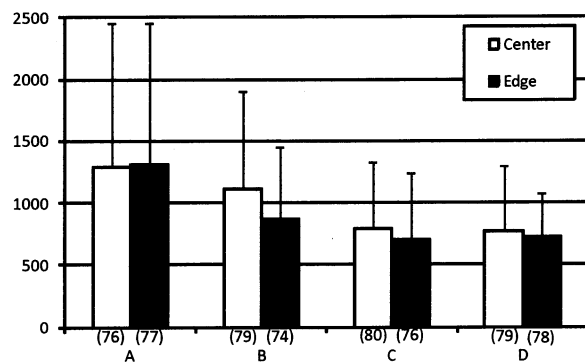
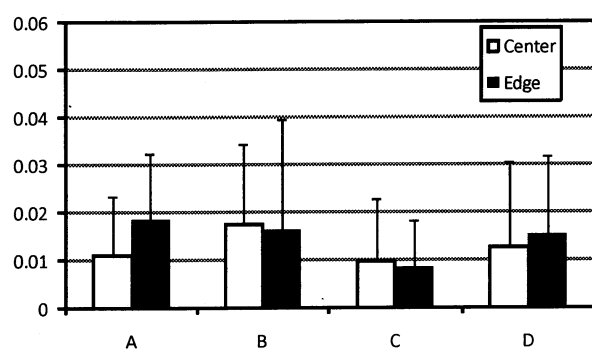
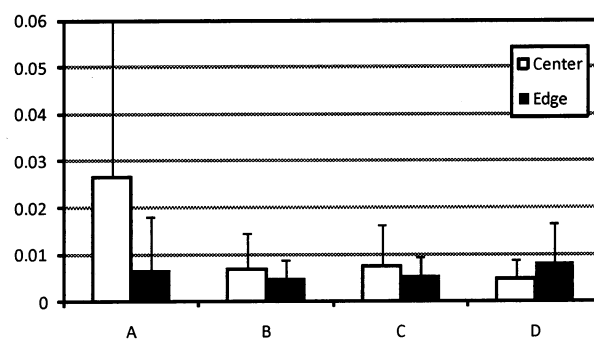
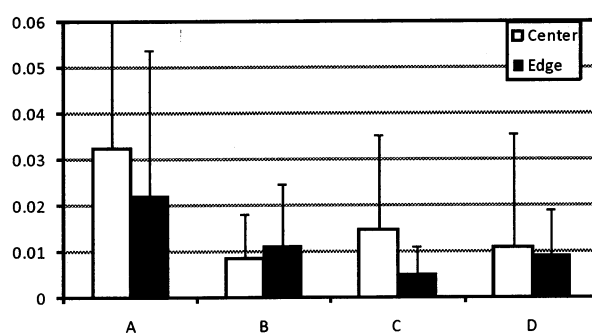
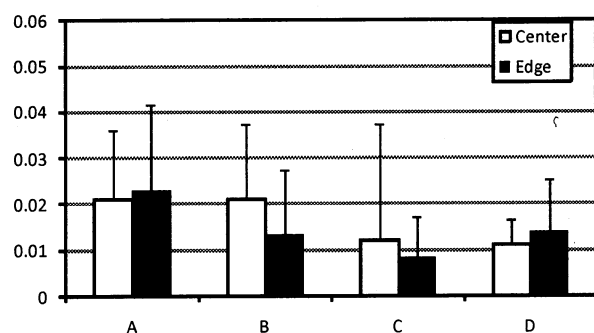
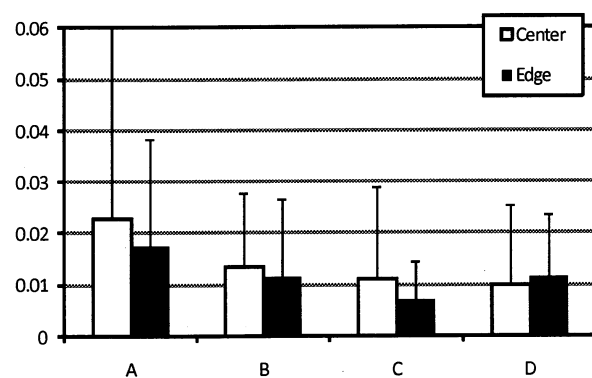
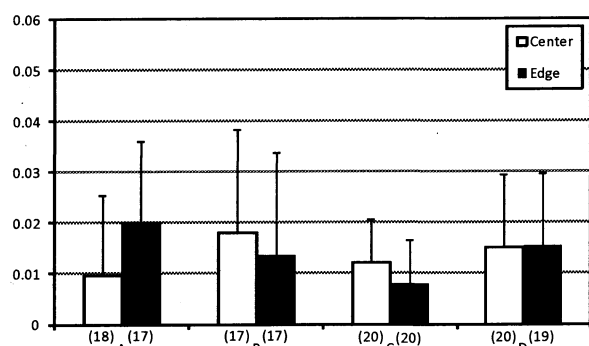
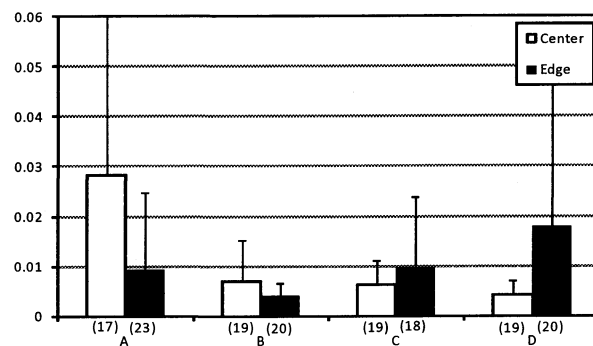
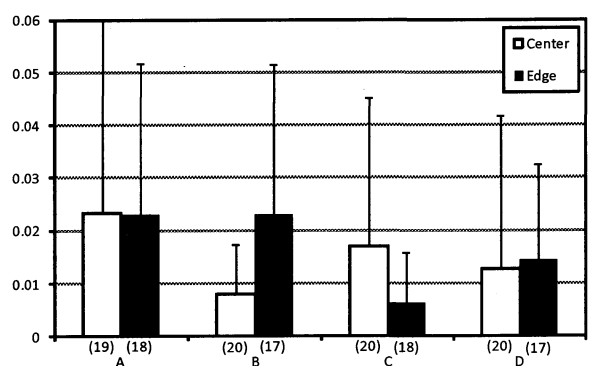
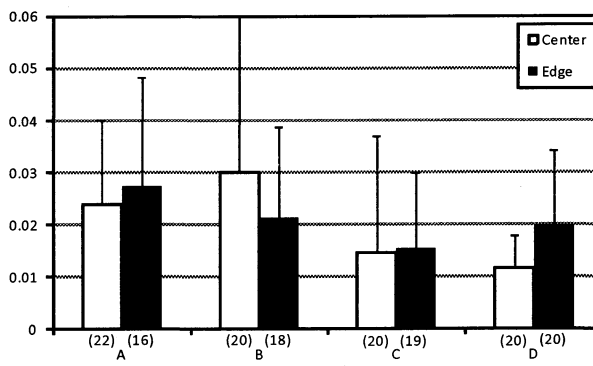
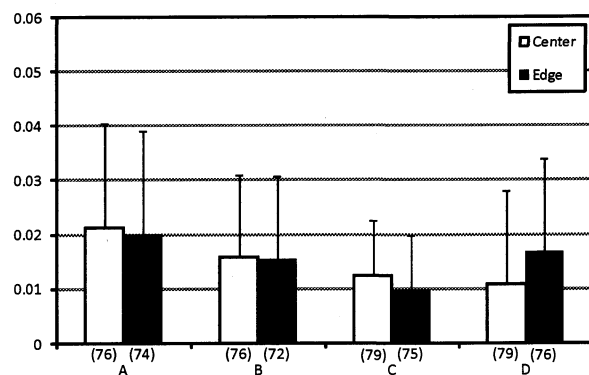


Fig.31 Jerk Value (Leader) comparison of marker "Center" and "Edge"

(a) Jerk Value (*Follower*), Left long(b) Jerk Value (*Follower*), Left short(c) Jerk Value (*Follower*), Right short(d) Jerk Value (*Follower*), Right Long(e) Jerk Value (*Follower*), Average of all target positionFig.32 Jerk Value (*Follower*) comparison of marker "Center" and "Edge"

(a) ER Value (*Center of gravity*), Left long(b) ER Value (*Center of gravity*), Left short(c) ER Value (*Center of gravity*), Right short(d) ER Value (*Center of gravity*), Right long(e) ER Value (*Center of gravity*), Average of all target positionFig.33 ER Value (*Center of gravity*) comparison of marker "Center" and "Edge"

(a) ER Value (*Leader*), Left long(b) ER Value (*Leader*), Left short(c) ER Value (*Leader*), Right short(d) ER Value (*Leader*), Right long(e) ER Value (*Leader*), Average of all target positionFig.34 ER Value (*Leader*) comparison of marker "Center" and "Edge"

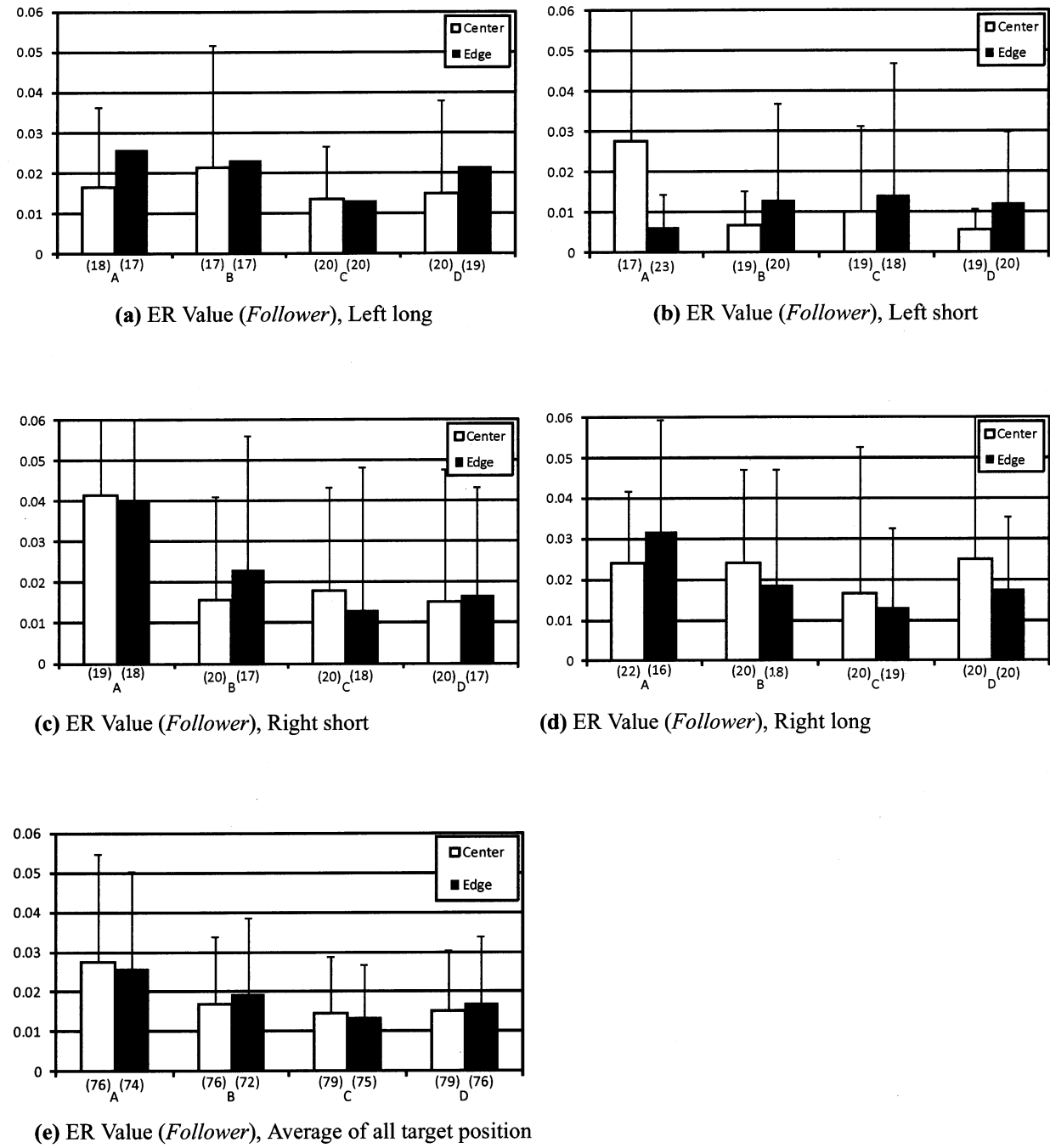


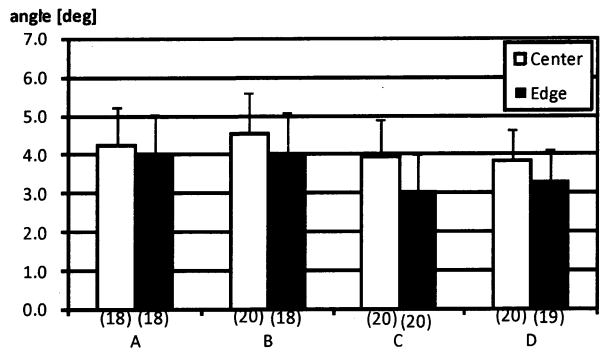
Fig.35 ER Value (*Follower*) comparison of marker "Center" and "Edge"

3.3.2 動作中の物体の傾き角度評価

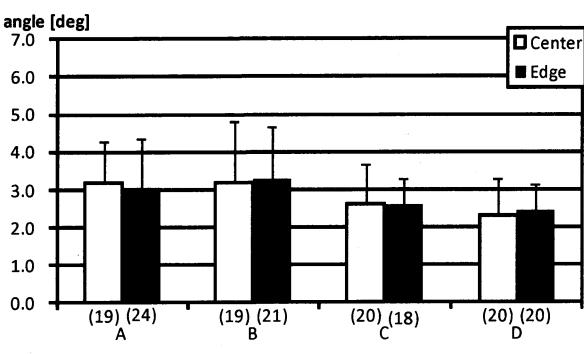
Fig.36, 37 は、それぞれ物体の最大傾き角度、平均傾き角度を、目印を中心に付けた場合と端に付けた場合を比較した結果を示している。各グラフの (a)(b)(c)(d) がそれぞれ4つの目標位置 (Left long, Left short, Right short, Right long) ごとの平均値、(e) は4つの目標位置をまとめて平均化したグラフである。

グラフより、平均傾き角度において特徴がみられたが、最大傾き角度には目標位置によるばらつきが大きく、全体の特徴はわずかしき見られなかった。目印が中心に付けた場合、目印が端にある場合と比較して、動作中に物体が傾いていても、被験者は把握しにくい。そのため、平均的に傾いたまま動作をすると、最大傾き角度は小さくても、平均傾き角度が大きくなると考えられる。この特徴は、フォロアーが目標位置を知らない条件 (A, B) で大きかった。フォロアーが目標位置を知らない場合は、フォロアーは速度を落とすので、物体が傾き、目印が中心にある場合は、傾きを把握しにくいため、このような結果になったと考えられる。

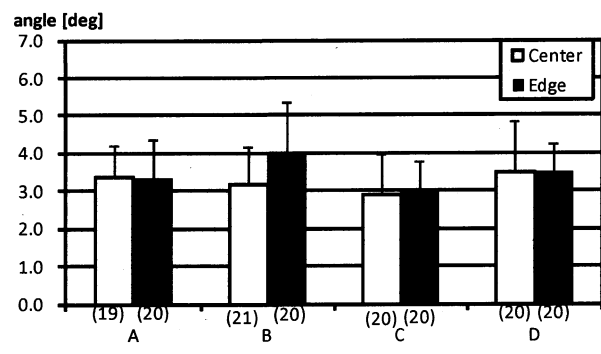
次に、A, B, C, D を比較するとフォロアーが目標位置を知っている条件 (C, D) では、最大傾き角度、平均傾き角度ともに小さい値になり、より良好な協調動作が実現したといえる。



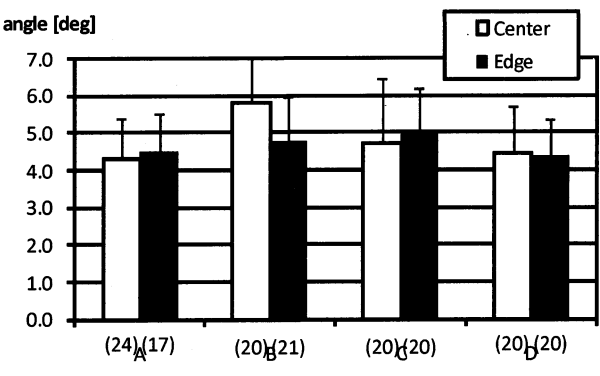
(a) Maximum angle, Left long



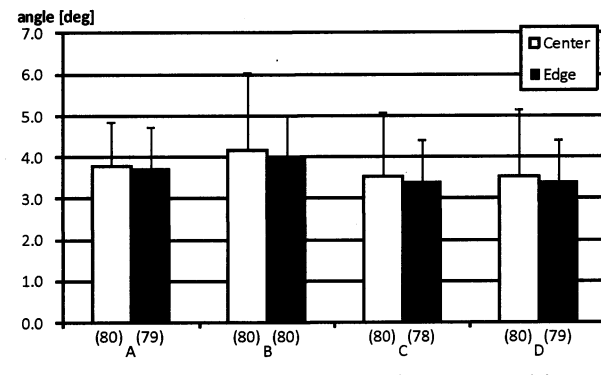
(b) Maximum angle, Left short



(c) Maximum angle, Right short

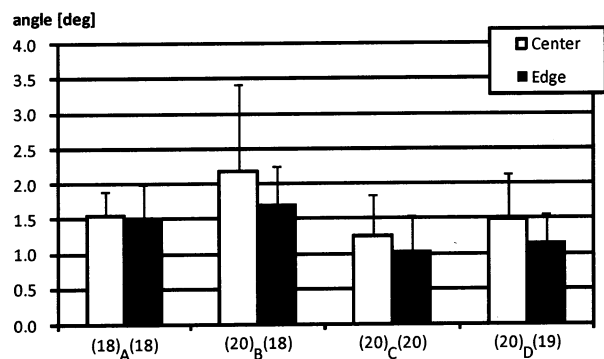


(d) Maximum angle, Right long

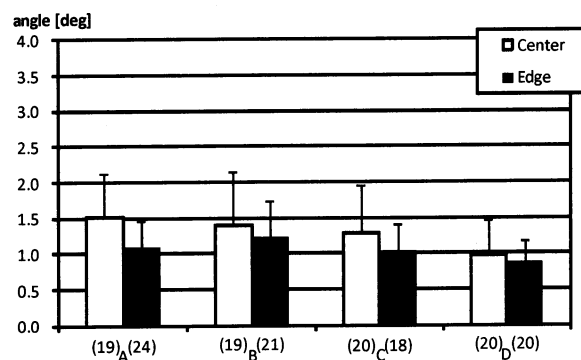


(e) Maximum angle, Average of all target position

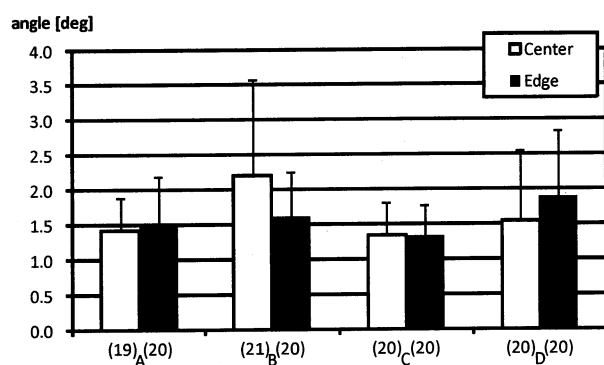
Fig.36 Maximum angle of object



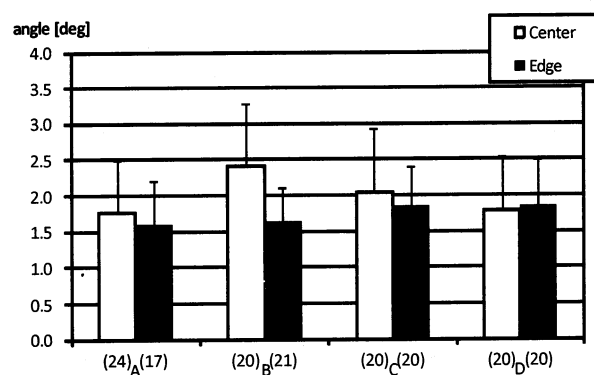
(a) Average angle, Left long



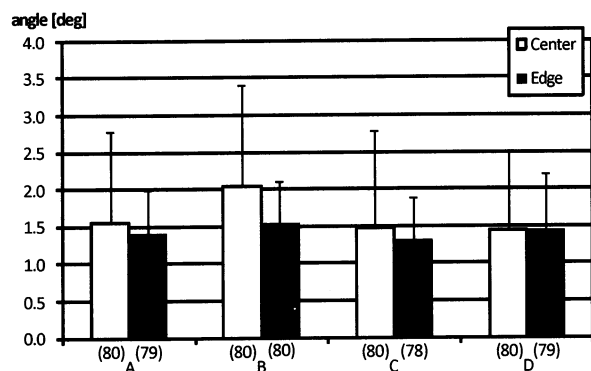
(b) Average angle, Left short



(c) Average angle, Right short



(d) Average angle, Right long



(e) Average angle, Average of all target position

Fig.37 Average angle of object

3.3.3 物体の重心の平均速度

Fig. 38 は、物体の重心の平均速度を、目印を中心に付けた場合と端に付けた場合を比較した結果を示している。(a)(b)(c)(d) がそれぞれ4つの目標位置 (Left long, Left short, Right short, Right long) ごとの平均値、(e) は4つの目標位置をまとめて平均化したグラフである。

目印が中心にある場合、フォロアーは物体の傾きを小さくしなければ物体の中心を目印に合わせることができないため、双方の速度が遅くなると予想された。結果は、グラフ (a) ~ (d) と (e) より条件 B, C においてのみ目印が中心にある場合の速度が速かった。しかし、条件 B, C はそれぞれ "フォロアーが目標位置を知らない・リーダーの合図あり"、"フォロアーが目標位置を知っている・リーダーの合図なし" であるので、目標位置や合図による影響は確認できなかった。前節の結果より物体の傾き角には影響が出たが、速度には影響は出なかった。これは、中心に目印を付ける場合、被験者は傾いていても把握しにくいので、そのまま動作が進んでしまい、重心の平均速度には影響が出なかったと考えられる。

次に、実験条件 A, B, C, D を比較すると前章と同様の特徴を再確認することができた。すなわち、フォロアーが目標位置を知らない条件 (A, B) では、重心の平均速度が遅かった。

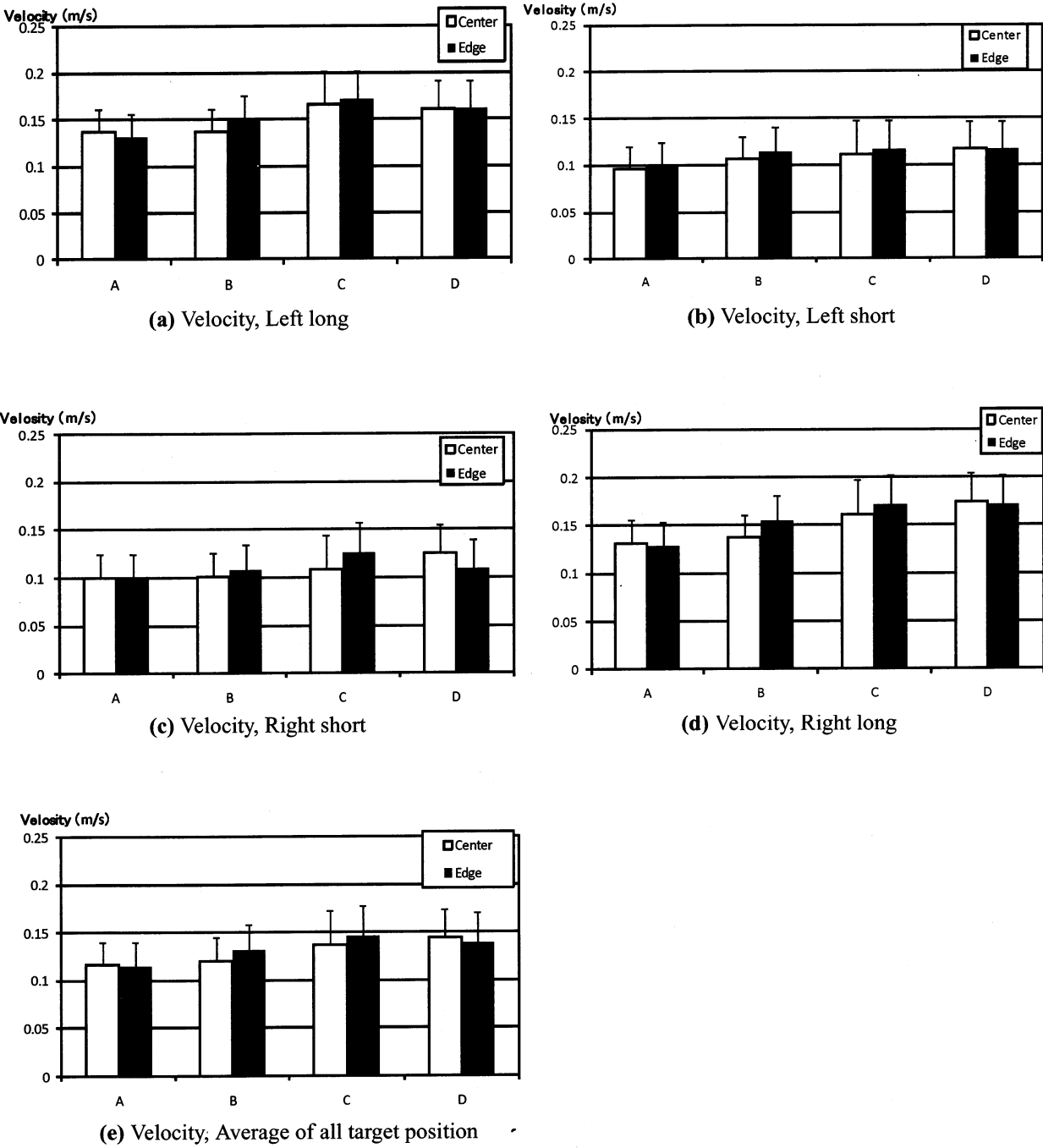


Fig.38 Velocity of Center of gravity

3.4 本章のまとめ

本章では、人間どうしの左右方向の協調物体運搬動作の実験において、前章の同様の実験条件に加え、モニター上の目標位置の目印をモニター上の物体の中心につける場合と端につける場合の条件を設定した。前章と同様に、躍度最小モデルによるなめらかさ評価、物体の傾き角度、物体の重心の平均速度を解析し、目印の位置による協調動作への影響を考察した。

解析の結果、目印を中心につける場合、物体の傾きを把握しにくいため、動作中の傾き角度が大きくなったことがわかった。動作のなめらかさ評価について、この条件ではフォロアーに目標位置を知らせない条件に限り、躍度の2乗積分値、ER値がやや大きくなったが、速度には影響は見られなかった。この条件では目標位置が長短どちらなのか判断しにくく、目印に合わせにくいため、フォロアーやリーダーがフィードバックすることもあり、他と比較しやや動作が乱れたと考えられる。目標位置を知っている場合は、目印の位置には影響しにくく、あらかじめ描いた軌道をもとに動作していると考えられる。

第4章

結言

人間と協調できるロボット制御に応用するため、物体の協調運搬を対象として人間どうしでの協調動作特性の解析を行った。本論文では、人間どうしが物体を協調運搬する実験を行い、第2章では、フォロアーへの目標位置の告知の有無、リーダーの動作開始の合図の有無の条件を設定し、第3章では目標位置を示す目印の変更の条件を設定した実験を行い、協調動作の特性を解析した。協調動作の良好性の判断のための指標として、動作のなめらかさ、動作中の物体の傾き角度を評価することを考えた。動作のなめらかさは、躍度最小モデルを評価指標とし、躍度の2乗積分値とともに、実際の速度波形と躍度最小軌道の速度波形から ER 値を算出した。

実験結果より、フォロアーが目標位置を知っている場合、躍度の2乗積分値、ER 値ともに小さくなり、なめらかな動作であることがわかり、物体の傾き角度も小さい結果となり、良好な協調動作が実現していることがわかった。また、この条件では動作速度が速く、これは、フォロアーがフィードバックした動作をすることが少ないからだと考えられる。第3章で述べた実験でも同様の特徴を確認できた。

リーダーの動作開始の合図の有無は、なめらかさ評価には影響せず、物体の傾き角度に影響した。合図がない場合、動作開始時にフォロアーに遅れが生じるが、目標位置が定まれば合図がある場合と同様に問題なく協調動作を実現できることがわかった。

次に、目標位置を示す目印を変更した実験では、目印が中心にあり、フォロアーが目標位置を知らない条件において、動作がやや乱れる傾向がみられた。目標位置を知っている条件では、目印の位置には影響しにくく、あらかじめ描いた軌道をもとにフィードフォワードして動作していると考えられる。目印が中心にある場合、被験者は物体の傾きを把握しにくいため、物体の傾き角度については大きく影響が現れた。

協調動作中フォロアーはリーダーの軌道を見てフィードバックしているものと予想していたが、フィードフォワードする方が良好な協調動作ができるという結果が以上の実験と考察により得られた。人間の反射能力には限界があるため、速いサイクルでフィードバックすることができない。そのため、フィードバックせずに動作することが望ましく、フィードバックした場合、動作が乱れることがわかる。人間は先の動作を予測できる場合、動作距離に応じた速度軌道をあらかじめ生成して動作するので、なめらかな協調動作ができると考えられる。人間と協調できるロボットに協調動作を応用するには、あらかじめ目標位置を指定し、動作開始のタイミングを合わせれば、人間となめらかな協調動作が実現できると考える。これは、人間はフィードフォワードで動作するという傾向から、人間の特性に合った速度軌道を生成できるからである。

上記のような結果が得られたが、人間は個人差が大きいため、すべての人間に汎用的に対応するためには、今後さらに被験者の数を増やして実験を行い、人間共通の特性を把握し、個人差による影響を排除できるようにすることが課題である。

参考文献

-
- [1] 国立社会保障・人口問題研究所 <http://www.ipss.go.jp/>
 - [2] 務省統計局, 政策統括官 (統計基準担当), 統計研修所: 高齢者人口の現状と将来 <http://www.stat.go.jp/data/topics/topics051.htm>
 - [3] 総務省: 人口推計月報 <http://www.stat.go.jp/data/jinsui/tsuki/index.htm>
 - [4] 経済産業省: ロボット産業政策研究会報告書のとりまとめについて <http://www.meti.go.jp/press/20090325002/20090325002.html>
 - [5] 池浦良淳, "人間とロボットによる協調作業", システム制御情報学会誌, vol.44, no.12, pp.682-687, 2000
 - [6] SHAHRIMAN Abu Bakar, Ryojun IKEURA, AHMAD FAIZAL Salleh and Takemi YANO "A Study of Human Sense Effects and Characteristic during Human-Human Cooperative Task," MASAUM Journal of Basic and Applied Sciences vol.1, no.2, 2009
 - [7] 半田裕一郎, Shahrman Abu Bakar, 矢野岳水, 池浦良淳, 水谷一樹, "人間どうしの協調運動特性解析の視覚と聴覚による影響", 計測自動制御学会中部支部三重地区制御研究講演会講演論文集, pp.B2.1-B2.4, 2007
 - [8] 池浦良淳, 森口智貴, 水谷一樹, "人間どうしの協調運動における腕の可変インピーダンス特性とロボット制御への適用", 日本機械学会論文集 C 編, vol.73, no.725, pp.251-257, 2007
 - [9] 田村健二, 池浦良淳, 水谷一樹, "人間とロボットの協調運搬動作の心理的評価", 日本機械学会東海支部総会講演会講演論文集, vol.53, pp.273-274, 2004
 - [10] Md M.Rahman, R. Ikeura and K.Mizutani. "Investigation of the impedance characteristic of human arm for development of robot to cooperate with human," JSME International Journal, vol.45, no.2, pp.510-518, 2002
 - [11] R. Ikeura, H. Inooka and K. Mizutani, "Subjective evaluation for maneuverability of a robot cooperating with humans," Journal of Robotics and Mechatronics, vol.14, no.5, pp.324-329, 2002
 - [12] R. Ikeura and H. Inooka, "Variable impedance control of a robot for cooperation with human," Proceeding of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3097-3102, 1995
 - [13] K. Kosuge, S. Hashimoto and K. Takeo, "Coordinated Motion Control of Multiple Robots Manipulating a large Object," Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS '97, pp. 208-213, 1997
 - [14] 田窪朋仁, 荒井裕彦, 林原靖男, 谷江和雄, "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
 - [15] Y. Hayashibara, Y. Sonoda, T. Takubo, H. Arai and K. tanie, "Assist System For Carrying a Long Object With A Human - Analysis of Human Cooperative Behavior in the Vertical Direction," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 3, pp.695-700, 1999
 - [16] 山中和博, 和田安弘, 川人光男 "3 次元ヒト腕運動における軌道計画規範の比較検討", 電子情報通信学会技術研究報告, vol.100, no.466, pp.55-62, 2000
 - [17] 前田雄介, 原崇之, 新井民夫, "躍度最小モデルを用いた動作予測に基づく人間 - ロボット協調作業", 日本機械学会論文集 C 編 vol.68, no.675, pp.3367-3372, 2002
 - [18] T. Flash and N. Hogan, "The coordination of the arm movement: an experimentally confirmed mathematical model", Journal of neuroscience, vol.7, pp.1688-1703, 1985
-

謝辞

本研究を進めるにあたり、研究の方向性や学会での発表、論文指導に至るまで、実に多くの場面で適切かつ親切にご指導いただきました指導教官である池浦良淳教授に深く感謝します。

また、本研究を進めるにあたり、研究の方向性や論文指導など適切かつ親切なご指導並びに多大なるご助言を頂きました早川聡一郎准教授に多大なる感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり、実験器具の設計、作製などでお世話になっただけでなく、多くの有益なご指導並びにご助言を頂きました澤井秀樹技官に多大なる感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり様々な場面で率先して行動し、多くのご指導を頂き、さらに研究を有意義なものにしてくださった Shahriman さん、Faizal さんに深く感謝するとともに、今後の更なるご活躍をお祈りしております。

最後に、自分達の研究外のことにもかかわらず、様々な点で助言してくださった石本唯常君、藤田哲矢君、野邊雅也君、Safwan 君に感謝の意を示し、今後の更なるご活躍をお祈りしております。
