

人間の物体把持における手の動作に関する実験的考察

An experimental study regarding human hand motion in object grasping

○熊澤 彰人 齋藤 直樹 梶川 伸哉 岡野 秀晴

○Akihito kumazawa, Naoki Saito, Shinya Kajikawa, Hideharu Okano

秋田県立大学大学院システム科学技術研究科

Graduate School of Akita Prefectural University, Faculty of Systems and Technology

キーワード: 位置決め完了時間 (Position completion time), 掴み動作 (Grasping motion)
視覚的影響 (Visual influence)

連絡先: 〒015-0055 秋田県本荘市土谷字海老ノ口 84-4 秋田県立大学大学院 システム科学技術研究科
機械知能システム学専攻 生体知能系 熊澤彰人
Tel. & Fax.: 0184(27)2217, E-mail: m05a006@akita-pu.ac.jp

1. 緒言

今日, 家庭用ロボットに代表されるように, 人間の生活環境で作業できるロボットの開発が期待されている. そのような環境でのロボットは, 物を渡すなどの手を使った人間との協調作業などが多く存在し, ロボットの動きにより恐怖感⁽¹⁾を与えることない, 人間と親和性のあるロボットの動きが重要となってくる. そこで, 人間の手と同様な形状・自由度を持つロボットハンドを製作する場合, より人間らしい手の動きをすることが人間との親和性を有するためには最も自然な方法であると考えられる. このようなことから, 人間の把持動作をロボットに適用することを目的とする研究が行われてきた.

把持動作の一部である人間の上肢運動について小川と森⁽²⁾は, 物体を持った上肢の直線運動パターン⁽³⁾の分析により, この運動の公式化を行い, これを一次サイバネティックモーションと定義している. また flash と hogan⁽³⁾は, 上肢の二関節平面運動を再現する躍度最

小モデルを提案し, 加速度の微分値で構成された評価関数を最小にするように手先の軌道を決定している. このように腕の軌道計画については研究が行われていたが, 指の動きに関して考慮されていなかった. これに関して中沢⁽⁴⁾らが, 対象物体を把持する場合の人間の親指と人差し指の指先軌道について, 人間の動作の計測より得られた結果からモデルを提示し, 腕から指までの一連の軌道計画に関して指針を示した. しかし, 人間の手は, 手首関節と人差し指関節の数を考慮すると冗長性を有しており, より人間らしい動作を実現するためにこれら関節の動作について詳細な解析が必要であると考えられる.

そこで本研究では, ロボットハンドへの適用を目的として人間の把持動作を取り上げ, この動作における掴み動作について人間が行っている各部の動作から手の各部が果たしている役割について解析し, さらに把持物体の変化による視覚的影響が動作に与える影響についても考察を行った.

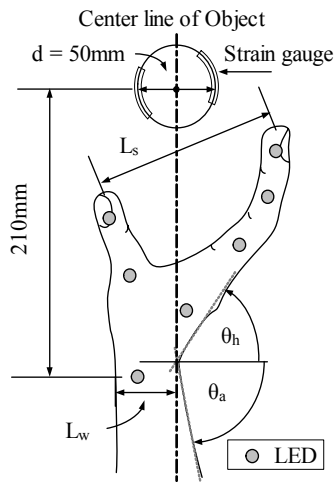


Fig.1 Initial position and posture of hand

2. 把持動作条件の設定

本実験では、正面からの把持動作において、手が物体を掴む動作の計測を行う。中沢らの実験⁽¹⁾と同様に物体手前 380[mm]より把持動作を行ったときの、指が物体を掴む動作に移行する位置を求めた結果、把持物体と手首の距離が 210[mm]となった。そこで本実験では、把持物体の正面手前 210[mm]を計測開始位置と設定する。この地点での手の姿勢・位置を計測し、この地点に仮想的な把持動作途中状態を作り、この状態から把持動作計測実験を行う。

3. 実験開始姿勢の決定

被験者は、物体正面より 380[mm]地点に手首を置き正面に配置された物体を、親指と人差し指の間で把持する。この動作時に、物体より手首が 210[mm]地点にきたときの、図 1 に示す L_s , θ_a , θ_h , L_w の部分を計測する。被験者は 3 名、全員 20 代男性で右利きである。この実験結果より、把持動作実験での手の姿勢・位置を固定できる治具を作り、これによりできる手の姿勢・位置を実験開始姿勢とした。

4. 把持動作計測実験方法

はじめに、手の各関節及び先端部の呼び方

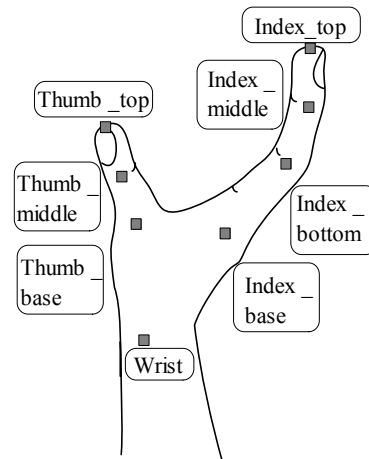


Fig.2 position names

について図 2 のように定義する。被験者は、図 1 の様に手を置き、実験開始姿勢から物体を把持する。物体は直径 50[mm]、高さ 125[mm]のステンレス円柱であり、物体との接触時刻検出用に、人差し指と親指が物体と接触する部分に歪みゲージを付けてある。また計測には PSD とポジションセンサを使用し、図 1 に示すように手に付けた LED からの赤外線を 10[msec]周期で計測し、図 2 に示す各関節位置データに変換したものを使用する。被験者は 3 名、全員 20 代男性で右利きである。考察では、特徴が最も平均的である代表的な 1 名の動きについて検討する。

5. 把持動作計測実験の結果と考察

把持動作における各関節の軌道を図 3 に示

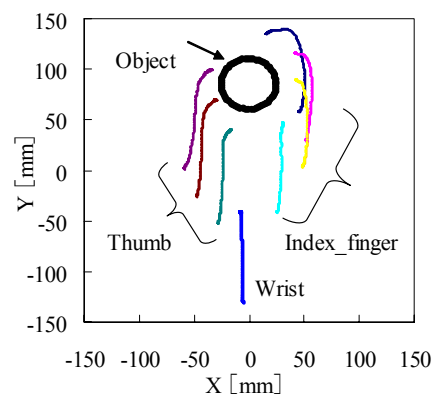


Fig.3 Time trajectories of two tips and six joints

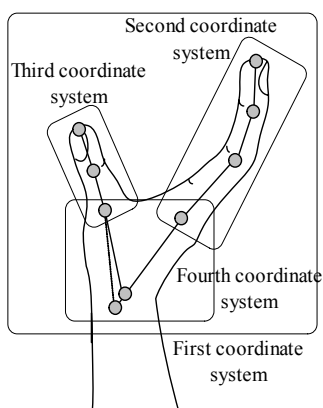


Fig.4 Coordinate systems

す. 図 4 は, これ以降の考察時に使用する 4 つ座標系を示す.

5-1. 位置決め完了時刻 t_c

ここでは図 5 に示す Wrist を原点とした第 1 座標系における Index_top と Thumb_top を考

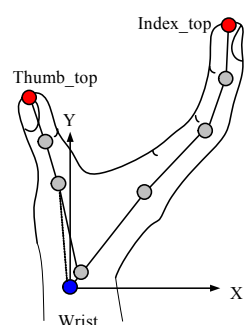


Fig.5 First coordinate system

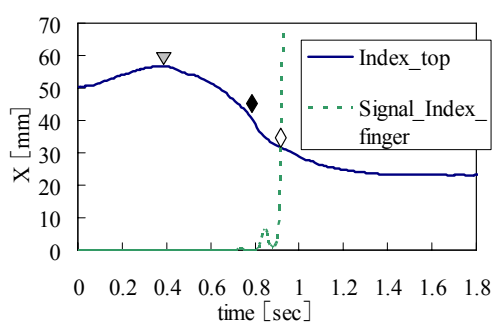


Fig.6 Time trajectory of Index top for X-axis

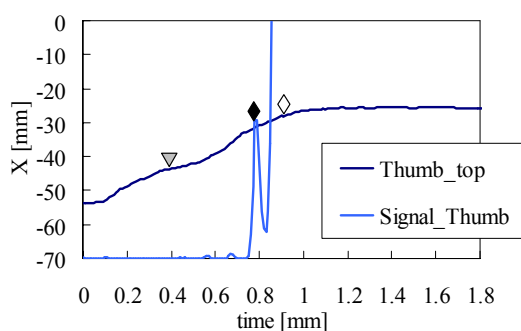


Fig.7 Time trajectory of Thumb top for X-axis

える. 図 6, 図 7 に Index_top と Thumb_top の時刻と X 座標の関係及び歪みゲージの出力を示す. Thumb_top は, 動作開始後から対象物体に接近する方向に移動するが, Index_top は, 動作開始から図中の印(▼)の時刻までは, 対象物体に対して遠ざかる方向に移動し, その後物体に接近する方向に移動する.

本論文では, 掴み動作を解析するのが目的であるので, このように掴み動作を開始する直前における, X 方向に最大となる時刻を位置決め完了時刻 t_c と定義し, これ以降の指の動作について解析を行う. また, これ以降に示す(▼), (◇), (◆)はそれぞれ位置決め完了時刻 t_c , 人差し指, 親指の各接触時刻を表す.

5-2. 把持物体への接近

ここでは Wrist を原点とした第 1 座標系を考える. 図 7 は, Wrist, Index_top, Thumb_top それぞれにおける速度を示している. いずれの指も物体に接触する前に速度ピークを迎え, 減少区間において物体と接触しているが, 指

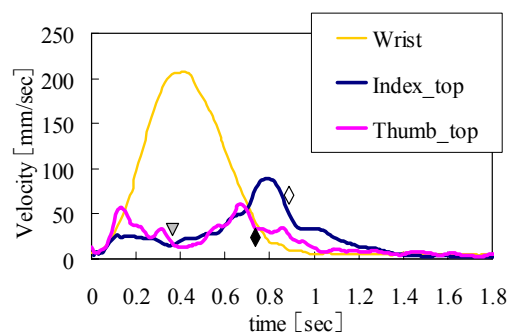


Fig.8 Velocity of Wrist and each fingertip

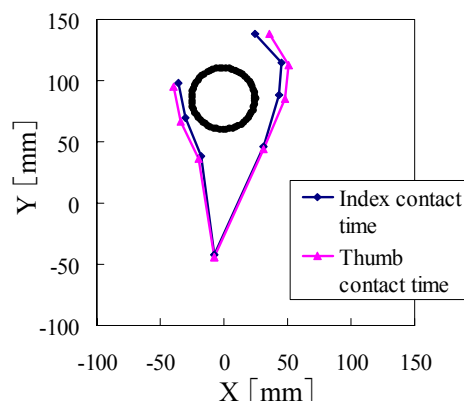


Fig.9 Plots of positions on each finger contact

先はこの後 0.5[sec]程度動き続ける．図 8 は，(◇)と(◆)の時刻における手の姿勢を示す．これより，物体と最初に接触をしたのは，Index_middle 付近と Thumb_middle 付近であり，接触後の速度減少区間は，指の一部が先に物体に接触し，最終的に指先が接触するまでの時間であると考えられる．

5-3. 人差し指の動き

ここでは図 10 に示す Index_base を原点とした第 2 座標系における Index_top, Index_middle, Index_bottom について考える．図 11 に Index_top, Index_middle, Index_bottom の時刻と速度の関係を示す．先端と各関節部では速度が異なり，指先側ほど速度も大きい

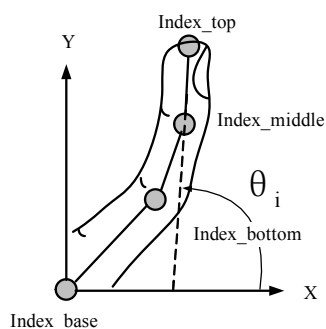


Fig.10 Second coordinate system

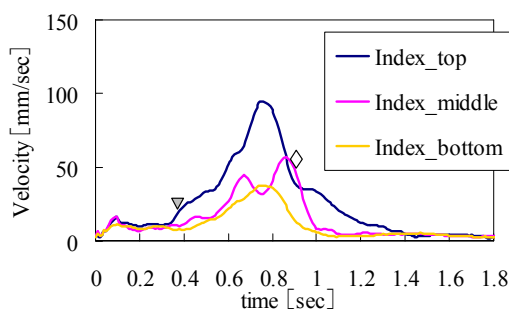


Fig.11 Velocity of joints and a tip of Index_finger

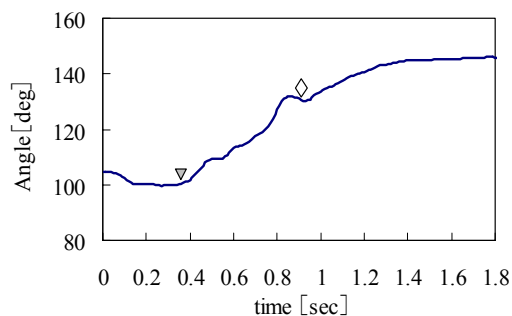


Fig.12 Angle θ_i of between the link from Index_top to Index_middle and X-axis

傾向がある．図 12 は，X 軸と Index_top-middle リンクのなす角 θ_i を示す．図より (▼)を過ぎると徐々に角度が増加し，(◇)後も，増加を続けていることが分かる．以上より人差し指は，対象物体に近づくにつれて各関節に速度差を付け，対象物体に対して包み込むような動きをしていると言える．

5-4. 親指の動き

ここでは図 13 に示す Thumb_base を原点とした第 3 座標系における Thumb_top, Thumb_middle, Thumb_base について考える．図 14 は，Thumb_top と Thumb_middle の時刻と速度の関係を示す．これより，各部に大きな速度差はないことが分かる．図 15 は，X 軸と Thumb_top-middle リンクのなす角度 θ_t を示

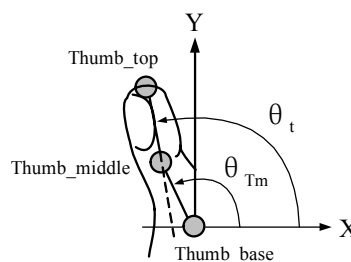


Fig.13 Third coordinate system

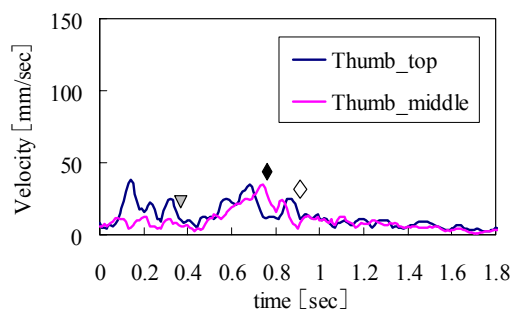


Fig.14 Velocity of joint and a tip of Thumb

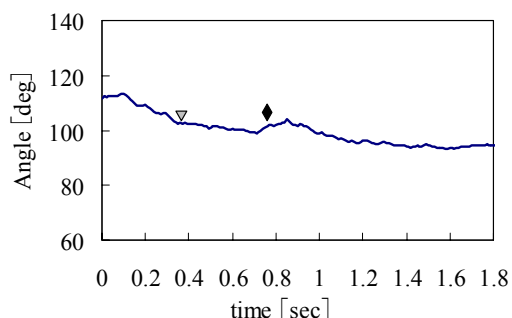


Fig.15 Angle θ_t between of the link from Thumb_top to Thumb_middle link and X-axis

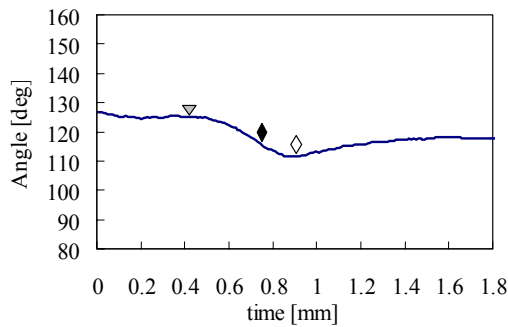


Fig.16 Angle θ_{Tm} of between the link from Thumb_middle to Thumb_base and X-axis

す。角度 θ_t は、(▼)前に大きく変化するが、(▼)から(◆)の間では約5度と小さい。これより、親指先端のリンクはほぼ平行移動していると考えられる。図16は、Thumb_middle-baseリンクのなす角 θ_{Tm} を示す。(▼)より角度を減少させ始め、(◇)では、ほぼ動きが止まる。従って、Thumb_base関節は回転しているが、Thumb_top-middleリンクの角度が変わらないようにThumb_middle関節で調節していると考えられる。また、図6と図7、図11と図14の(▼)から(◇)の区間を比較すると、親指は人差し指より移動量及び速度が小さいことが分かる。また図15より、(◆)以後はほぼ変化がない。以上より親指は、把持位置を調整する基準として動かされ、接触後には物体の支えとなる役割をしていると考えられる。

5-5. 人差し指と親指の付け根の動き

ここでは図17に示す、Wristを原点とした第4座標系におけるIndex_base、Thumb_baseについて考える。図18、図19は、時刻とWrist-Index_baseとWrist-Thumb_baseリンクがX軸となす角度 θ_{Ib} 、 θ_{Tb} の関係を示す。両

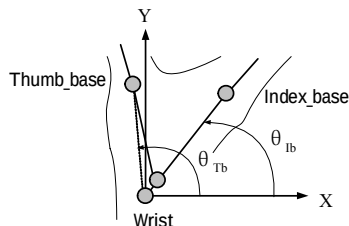


Fig.17 Forth coordinate system

図より Index_base、Thumb_base は動作開始より角度を一定の割合で減少させ物体に接近している。図20は、Thumb_baseとIndex_base、それぞれの時刻とX方向の変位量との関係を示す。これよりThumb_baseは、動作開始後しばらくはIndex_baseの動きに従っているが、0.5 [sec] 付近から徐々にIndex_baseよりも移動量が大きくなっている。以上より、Index_baseとThumb_baseには、0.5 [sec] 付近までは、大きな動きの違いはなくThumb_base側リンクは、Index_base側リンクに従い動くが、対象物体に接近するとThumb_baseは、Index_baseとは別の動きにより物体に接近し把持を行っている。

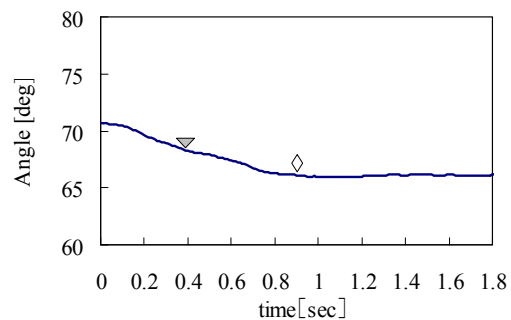


Fig.18 Angle θ_{Ib} of between the link from Wrist to Index_base and X-axis

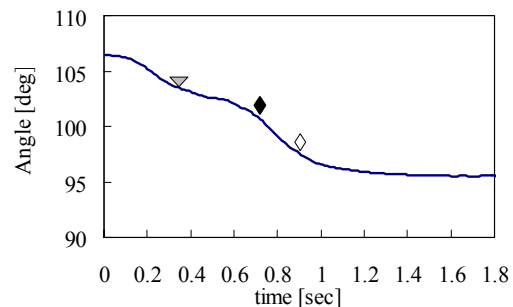


Fig.19 Angle θ_{Tb} of between the link from Wrist to Thumb_base and X-axis

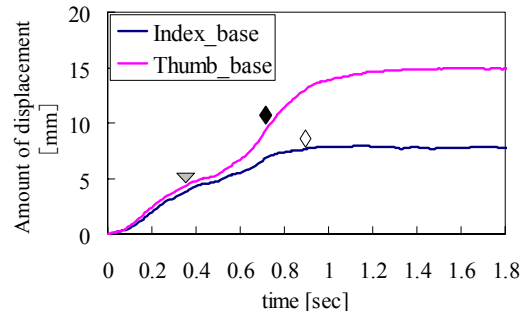


Fig.20 Amount of displacement of Index_base and Thumb_base along X-axis

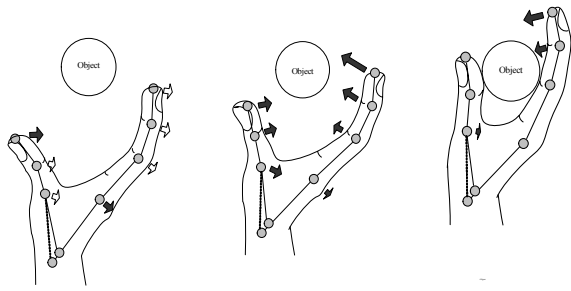


Fig.21 Continuous movement of hand

5-6. 考察のまとめ

図 21 は,これまでの考察による手の各部の動きのイメージ図であり, 左から順に動作開始から(▼)前まで, (▼)から(◇)まで, (◇)以降の各状態を示す. また, 白矢印は Index_base の動きによる動き, 黒矢印は各部の動きを示し, 矢印は動きの大きさ及び方向のイメージを表す.

以上より今回の把持物体では, 親指は把持位置を調整する基準として動かされ, 接触後には物体の支えとなる. この時, 親指の付け根部は, この動きを補助する動きをする. 逆に人差し指は, 物体を包み込む動きをし, 手の甲は把持のしやすい姿勢に全体を持っていく. これら各部の役割の連携により, 人間は安定した物体把持を可能にしていると考えられる.

6. 視覚的影響実験

物体の状態変化による視覚的影響が人間の把持動作生成に与える変化を見るために把持物体を前実験と同形状の紙コップに変え, さらに把持物体に視覚的に変化の分かる 3 つの状態を作り, 把持動作計測実験と同様の方法で実験を行った. 被験者は 3 名, 全員 20 代男性で右利きであり, 特徴が平均的である 1 人の結果を実験結果とした.

6-1. 把持物体の設定

次に示すのは, 把持物体の 3 状態であり,

さらに本実験で想定する各状態の位置づけである.

I. 紙コップのみ

→注意度 低

II. 容器に 50%程度の水が入った紙コップ

→注意度 中

III. 容器に 90%程度の水が入った紙コップ

→注意度 高

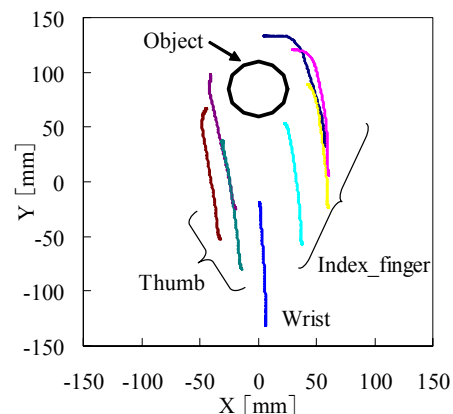


Fig.22 Time trajectories of two tips and six joints in Warning Level Low

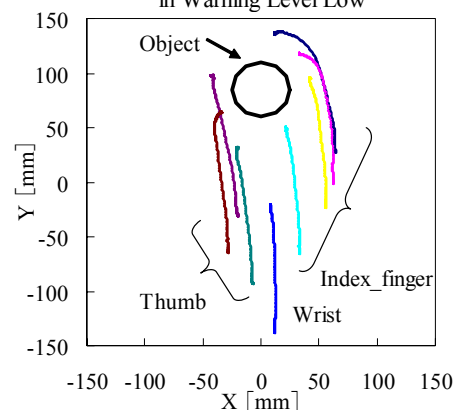


Fig.23 Time trajectories of two tips and six joints in Warning Level Middle

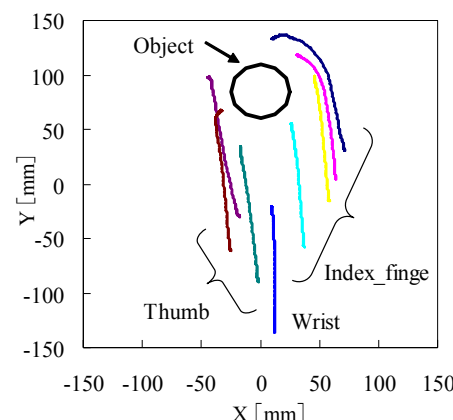


Fig.24 Time trajectories of two tips and six joints in Warning Level High

7. 視覚的影響実験の結果と考察

図 22, 23, 24 に示すのは, 3 状態の各部の把持動作軌道である. これを比較すると Wrist, Index_base, Thumb_base 部分の軌道は大きな違いはないことが分かる. 一方, Index_top, Thumb_Top は, 把持物体に接近後の軌道に若干の違いが見られることが分かる. このことより, Wrist の接近速度及び, 各指の先端の動きについて詳しく見ていく.

7-1. 位置決め完了時間 t_c

ここでは Wrist を原点とした第 1 座標系における Index_top について考える. 図 25, 26, 27 は, 3 状態における Index_top の時刻と X 座標の関係及び歪みゲージの出力を示す. この図について定義に基づき, 位置決め完了時

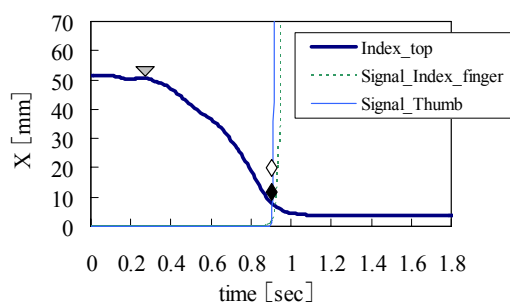


Fig.25 Time trajectory of Index top for X-axis in Warning Level Low

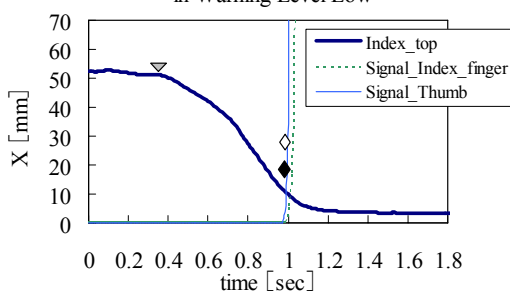


Fig.26 Time trajectory of Index top for X-axis in Warning Level Middle

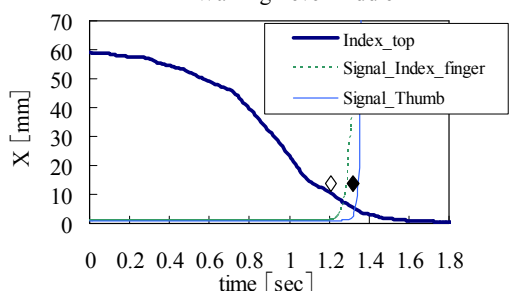


Fig.27 Time trajectory of Index top for X-axis in Warning Level High

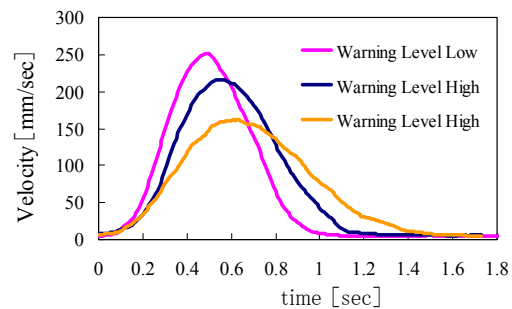


Fig.28 Velocity of wrist of three patterns

刻 t_c を 3 状態それぞれについて求めた. その結果, 順に $t_{cL}=0.25$, $t_{cM}=0.34$ とし, 図 27 については開始時刻から常に減少傾向にあるので $t_{cH}=0$ とした. また, 図の歪みゲージの出力より各状態の Index, Thumb の接触時刻を求めた. 前章と同様に位置決め完了時刻 t_c (▼), 人差し指と親指の接触時刻をそれぞれ(◇), (◆) とし, これ以降に記述する.

7-2. 把持物体への接近

図 28 に示すのは, 各状態の Wrist の接近速度である. この図より注意度が増すにつれ Wrist 速度が減少していることが分かる. その結果として, 動作完了時刻が遅くなっていることが分かる.

7-3. 人差し指の動き

ここでは Index_base を原点とした第 2 座標系における, Index_top について考える. 図 29 に, 3 状態における Index_top の時刻と速度の関係を示す. この図からまず, (▼) 以降を見ると, 水が入ったことにより注意度低に対して注意度中と高は速度が減少していることが分かる. また, 注意度高の場合, (◇) の直後に急激に速度が減少し接触後また一時的に増加していることが分かる. これは, 把持物体との接触に備えて速度を減少させたためだと考えられる. さらに, (◇) から速度が完全に 0 になるまでの時間が, 注意度が増すにつれて増加していることが分かる. また, 図 30 に示すのは 3 状態それぞれの (◇) を時

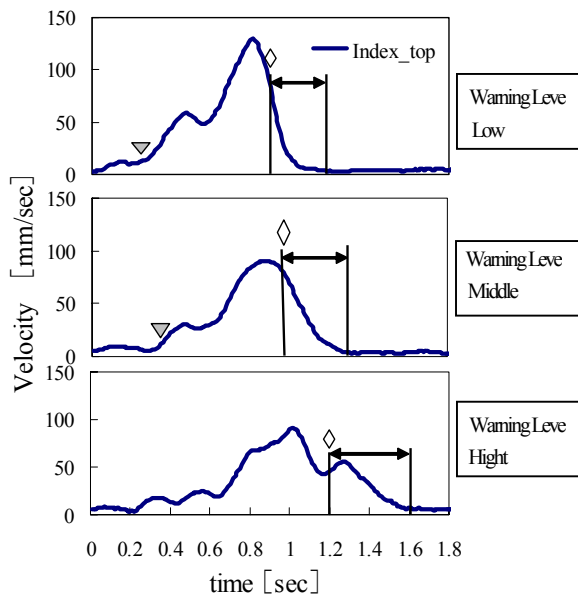


Fig.29 Velocity of a tip of Index_top of three patterns

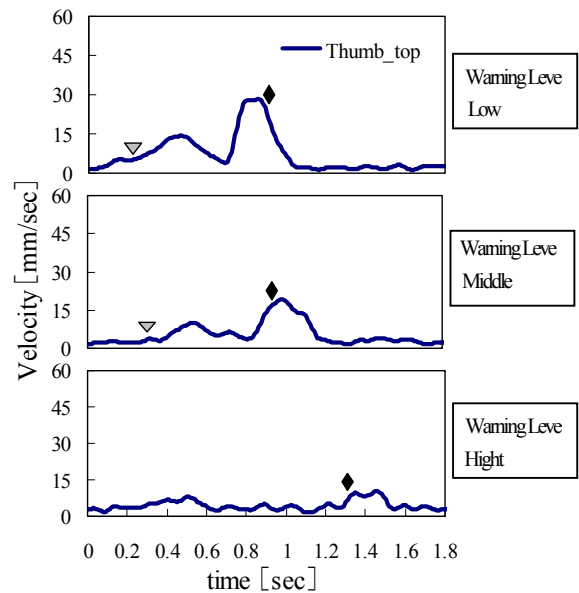


Fig.31 Velocity of a tip of Thumb_top of three pattern

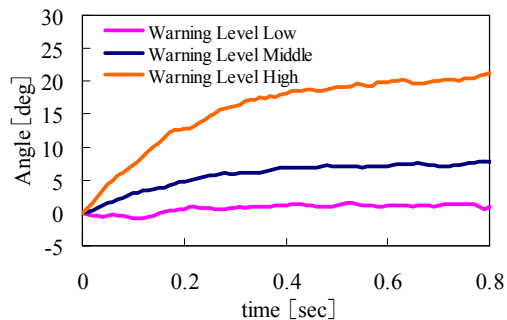


Fig.30 Angle θ_i in three patterns between of the link from Index_Middle to Index_top and X-axis

刻を 0 とし、それ以降の Index_top-middle リンクのなす角 θ_i である。これを見ると、注意度が増すほど接触後の角度変化が大きいことが分かる。このリンクの角度変化が大きくなることは、把持物体側にリンクを傾けているということであるので、危険度が増すことで接触後に指先を把持物体に回しこんでいることが分かる。つまり、注意度が低い場合は、人差し指の一部が接触した時点でほぼ包み込み動作が終了しているが、注意度が高くなると包み込み動作が接触後に移行していることが分かる。

7-4. 親指の動き

ここでは、Thumb_base を原点とした第 3 座標系における、Thumb_top について考える。図 31 は、3 状態それぞれの Thumb_top の速度

と時間の関係である。(▼) から (◆) までの接近段階について見ると、速度が減少していることが分かる。このことより、前実験の考察より親指は把持位置を調整する基準としての役割があると考えられており、この場合より注意度が増すにつれて速度が徐々に減少することから、親指は、把持位置を調整する基準としての役割が大きくなっていると考えられる。次に接近後の (◆) においても注意度が増すにつれて速度が小さくなっており、これは物体との接触時の衝撃を軽減する目的があると考えられる。

7-5. 考察のまとめ

Wrist, Thumb_base, Index_base 接近時において軌道は大きな違いがないことが分かった。しかし、接近速度や物体近傍で各部は、注意度によって把持動作に変化があることが分かった。

手首に関しては注意度が増すことで、接近時の速度が減少することがわかり、このことにより把持動作完了により多くの時間要することが分かる。

人差し指に関しては、注意度が増すにつれ

て速度は減少することが分かった。また、接触後の速度減少区間が増加することがわかった。さらに、接触後に包み込み動作に移行することが分かった。

親指に関しても、注意度が増すにつれて速度が減少していることが分かった。このことから、把持位置を調整する基準としての役割が大きくなったと考えられる。また、接触時の衝撃を軽減する効果もあると考えられる。

以上のことをから、視覚的影響により各部の傾向として注意度が増すにつれて、全体として丁寧に把持物体を掴もうとする把持動作生成が行われていることがわかった。

8. 結言

本論文では、人間の掴み動作における、手首と人差し指、親指の各関節の動きと指先端軌道を測定し、解析を行った。その結果より、把持動作時の手の各部の動きを明らかにし、親指と人差し指の役割について考察した。また、物体の状態変化による視覚的影響により人間の把持動作生成に与える影響について実験を行い手首、人差し指、親指に与える影響について明らかにした。

今後の展望は、把持軌道のモデル化を行いロボットハンドへ適応することで、実験結果の検証および人間の日常生活へのロボットハンドの適応について考えていきたい。

参考文献

- (1) 柴田 論, 猪岡 光: 評価尺度法によるロボット運動の心理的評価, 人間工学, 31(2), pp151~159, 1995.
- (2) 小川 鑛一, 森 政弘: 物体を持った上肢の直線運動パターンの分析, 人間工学, 13(3), pp91~98, 1977.
- (3) T.Flash and N.Hogan : The coordination of Arm Movements : An Experimentally Confirmed Mathematical Model , J.of Neurosciences, 5(7), pp1688~1703, 1985.
- (4) 中沢信明, 梶川伸哉, 猪岡光, 池浦良淳, 把持動作における指先軌道の実験的考察, 人間工学, 36(1), pp19~27, 1999.