手先による落下物体制動動作の解析*

山 本 智 規^{*1}, 柴 田 論^{*2}
神 代 充^{*2}, 清 水 顯^{*2}

Analysis of Braking the Fall of an Object with Human Hand

Tomonori YAMAMOTO^{*3}, Satoru SHIBATA,
Mitsuru JINDAI and Akira SHIMIZU^{*3} Ehime University, Dept. of Mechanical Engineering,
Bunkyo-cho 3, Matsuyama Ehime, 790-8577 Japan

We experimentally analyzed the motion that human try to stop an object accelerated by gravity with his or her hand as smooth as possible. The trajectories of human hand motion observed in the experiments were reproducible and showed smooth profiles after the sufficient attempts. Changes in softness of human hand in the attempt were approximated by variable impedance model. The approximated changes of impedance parameters were divided into three phases, in which human changes his or her control modes. Moreover, human control performance was investigated from the view point of passivity. The results showed that the system was passive throughout the motion, and that the profiles of the passivity showed bell-shaped, which is peculiar to human smooth control performances.

Key Words: Biomotion, Human Engineering, Human Interface, Impedance Model, Bell-Shaped Passivity

1. は じ め に

将来, 病院や家庭のような日常の生活空間で, 人間が行うさまざまな作業を補佐するためにロボット等の知能機械が利用されることが予想される. このような知能機械には, 正確で高速な繰返し運動というよりもむしろ, 人の行うペースに合せ, 人にやさしい動作を新たな規範のもとに行うことが求められる.

サービスや看護, 福祉の目的で知能機械を利用する場合, 知能機械は, 人間に接触して力を伝えながら動作することが十分考えられる. 例えば, 眠っている赤ん坊を受け取ったり, バランスを失った人間を支えたりするときなどは, 知能機械は柔らかさをもち, 人間に対して大きな違和感をもたせないようにその柔らかさを調節すべきである. 一方, 人間の場合は, 相手の体や心地よさに気を使い, 巧みに柔らかさを調節してそのような動作を行うことができる. このように相手を思いやる人間の制御動作は, 人間と共存する知能機械の制御方策にとって大きなヒントとなりうる.

人間上肢の柔らかさ(機械インピーダンス)については, 多くの研究者によって計測実験が行われている. 姿勢保持中の上肢については, 手先剛性が姿勢により規則的に変化することが示されている⁽¹⁾⁽²⁾. また, 粘性, 慣性をも含んだ推定が行われている⁽³⁾⁽⁴⁾. さらに, 上肢の運動制御法解明の観点から運動中の特性が推定されており, 姿勢保持中のそれとは大きく変化することが報告されている⁽⁵⁾. ここでは, これらの研究のように人間上肢が本質的に有するインピーダンス特性を解明することを目的とはせず, 相手を思いやる人間の優れた制御動作を知能機械へ実現しようという試みから, 可変インピーダンスモデルで人間の制御動作を近似するというを行う. これにより, 知能機械はインピーダンス制御することによりそれらの特性を再現することが可能である. また, インピーダンスモデルで近似するもう一つの意味は, 人間の制御動作が, 見かけの慣性, 粘性, 剛性をうまく調節して行われている可能性を検討するためである⁽⁶⁾.

以上のことにより本研究では, 人間が行うサポート動作の最も単純な場合として, 一定外力を受ける物体をやわらかく静止させる動作, すなわち落下物体をなめらかに静止させる動作を解析する. そして, 手先が発生する力を時変なインピーダンスモデルで表現し,

* 原稿受付 1999年5月14日.

^{*1} 学生員, 愛媛大学大学院 (〒790-8577 松山市文京町3).^{*2} 正員, 愛媛大学工学部.

E-mail: yamamoto@cont2.me.ehime-u.ac.jp

人間の制御特性を考察する。さらに、受動性という指標を用いて、システム全体の特性について検討する。

2. 実験装置

図1に実験装置を示す。KANETEC社製電磁ホルダ(マグネット)KE-4Bが金属板に水平に装着されている。対象物体は円筒形であり、中央がマグネットに吸着されている。マグネットのスイッチのオンオフは、コンピュータにより制御される。また、図1のように、対象物体上面の垂直方向の変位を、KANETEC社製変位センサLB 1200を用いて測定している。ただし、試行中における対象物体の傾きを考慮し、図1(b)に示されるように三つの変位センサを用いて対象物体上面の3点を計測し、その中心点の変位を算出した。なお、センサの分解能は $50\mu\text{m}$ である。測定された変位量はアナログ電圧出力としてアンプから出力され、A/Dコンバータを介してコンピュータに取込まれる。対象物体はA～Dの鉄製円筒形物体で、質量はそれぞれ0.3 kg, 0.6 kg, 0.9 kg, 1.2 kgであり、

(a) Side view of the system

(b) Top view of the apparatus

Fig. 1 Experimental system

直径は、手のひらの大きさに合わせてすべて100 mmとした。

3. 実験方法

対象物体は最初マグネットにその中央部が吸着されており、被験者は手のひらと物体との衝突現象を避けるため、利き手の手のひらを軽く対象物の底面に当てて準備する。物体と手のひらの衝突現象についてはHertzの反発力モデルを考慮する必要がある⁽⁷⁾、実験結果のモデル化が複雑になるので本研究では取上げないこととする。また、被験者の肘関節は 90° にし、手首を使わないように指示する。そして合図とともにマグネットのスイッチを切り対象物を落下させ、被験者は物体の落下運動を任意の位置で静止させる動作を行う。ただし、合図としてコンピュータのbeep音を2秒間鳴らし、その終了と同時にマグネットのスイッチが切れるようにした。物体が落下(スイッチがOFF)し始めてから静止するまでの変位を、変位センサでサンプリングタイム5 msで計測する。また被験者は右利きの年齢22～24才の健康男性5名とした。

実験に先立ち、被験者は各対象物体につき30回の練習試行を行った。これにより、被験者はこの動作に対し十分に学習し、再現性のある滑らかな制御軌道を示すことができる。その後、本実験として、10回の試行を1セットとした3セットの測定を行った。

4. 実験結果および考察

4.1 測定結果 図2は、代表的な対象物体の変位(すなわち手先変位)、図3は速度、図4は加速度の変化を示しており、(a)は被験者YK、(b)は被験者TIの結果をそれぞれ示している。ただし、位置、速度、および加速度のデータは、位置データを基準に数値的に16点のスムージング、数値微分、数値2階微分を2回施して求めた⁽⁸⁾。動作終了点は、物体の最大変位時刻とする。ここで、動作時間については有意に個人差が存在したので、横軸を動作時間で正規化した結果について検討する。

図2からわかるように最大変位量は被験者によって異なるが、対象物体の質量が同じならば、同じ被験者では学習後、ほぼ一定の値を示すようになる。また、図2の各変位データは、最終値に至るまで、極値や変曲点のような、修正動作に伴う変動のない単調な変化をしており、被験者の優れた制御性能がうかがえる。また、図より対象物体の質量が大きくなるほど最大変位の値が大きくなる。このことから、静止位置に制約がない場合、物体の質量が増加すると変位量

(a) The results of subject YK

(a) The results of subject YK

(b) The results of subject TI

(b) The results of subject TI

Fig. 2 Normalized position

Fig. 3 Normalized velocity

も増加することが明らかになった。

図3に示すとおり速度パターンは、速度ピークが中央からやや前半に位置する釣鐘型となった。小川ら⁽⁹⁾は、手先に一定の負荷をかけた位置決め運動について実験的に解析したが、その速度パターンは速度ピークが動作時間中央からやや前半に位置する釣形となり、本研究の結果と定性的に一致する。小川らは、この運動をサイバネティックモーションと名付け、機械動作美化のために必要な運動であると位置付けた。

また、図からわかるもう一つの特徴は、物体の質量が最も小さい0.3 kgという実験条件における速度ピークの動作時間内における位置がもっとも前方にあり、質量が増加するにつれて動作時間中央方向へ移動していることである。人間の四肢位置決め運動において、精度や負荷などの制約条件が厳しくなると、速度ピークが動作時間前半に移動することが報告されている⁽¹⁰⁾がそれとは逆の特徴である。この原因については現在検討中であるが、手先制御動作の難易度が必ずしも速度ピークの動作前方への移動⁽¹¹⁾という特徴に対応していないことが示された。

図4において加速度が零になる位置は、速度が最大値をとる位置であり、負の値をとる部分は鉛直上向き

(a) The results of subject YK

(b) The results of subject TI

Fig. 4 Normalized acceleration

の加速度であることを示している。図に示すように、加速度は動作開始から動作後半に加速度が最小値をとる部分まで減少し、その後、動作終了にかけて増加傾向を示している。これは、加速度の変化が物体に加える力に深い関係があることを踏まえると、人間が運転している自動車を停止させる際、ブレーキを徐々に踏み込んで、停止する直前にいったん踏力を減少させることにより、同乗者にショックを与えないスムーズで柔らかい停止を実現するという操作によく似ている。この特性は、人にやさしい知能機械の制御への指針になることが期待される。

4.2 可変インピーダンスモデルによる制御動作の近似 人間が対象物体を静止させる場合、試行初期ではその特性に大きなばらつきがあるが、試行を重ねると再現性のあるなめらかな特性が得られることがわかった。したがって、機械に人間の特性を応用する際、これらの再現性のある特性をモデル化することが重要であると考え、人間が生成したやわらかさの変化を、図5のようなインピーダンスモデルで近似することを試みる。

運動方程式は、人間が対象物体に鉛直方向に上向きに加える力を f とし、対象物体の質量を m kg、重力加速度を g m/s² とすると、

$$mg - f = m\ddot{x} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、人間が発生する力を以下のインピーダンスモデルで近似する。

$$f = M(t)\ddot{x} + C(t)\dot{x} + K(t)x \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$M(t)$: 慣性

$C(t)$: 粘性

$K(t)$: 剛性

式(2)を式(1)に代入すると

$$(M(t) + m)\ddot{x} + C(t)\dot{x} + K(t)x = mg \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここで、微小時間では $M(t)$, $C(t)$, $K(t)$ が一定であるとする、最小二乗法を用いることによりそれらを推定することができる。ただし、その微小時間の大きさは、インピーダンスモデルで再現された位置の推定値と実測値の誤差が最も小さくなるように選んだ。

図6～9は、被験者 YK における推定されたインピーダンスパラメータの変化 [$M(t)$, $C(t)$, $K(t)$ に相当] を示し、図10～13は、被験者 TI における推定されたインピーダンスパラメータの変化を示している。図をみてわかるように、パラメータの変化は三つの Phase に分けることができ、これは対象物体の質量や被験者の違いにかかわらず見られる傾向であった。以

Fig. 5 Approximation by the impedance model

下、それぞれについて、人間の制御特性の観点から考察する。Phase 1では、動作開始時に剛性を高め、粘性を増加させていることから、物体の落下に対して早めに対処しようとする姿勢がうかがえる。Phase 2では、慣性は増加し、粘性は減少、剛性は増加し、その変化は急激である。したがって、被験者は物体の落下を感じ取った後、粘性の値を小さくし始め、物体が落下しようとする速度に合せ、剛性を増加させて変位を調整している。Phase 3では、再び粘性を増加させて速度を減少させ、その後凸型の粘性変化により安定な静止動作を実現している。

4.3 受動性の変化による人間の制御特性の検討

ここで、近似された特性が知能機械-人間共存システムに適用可能かどうかを検討するために、受動性という観点から人間の制御特性を検討した。

受動性については、人間とロボットの協調動作に関して、小菅ら⁽¹²⁾は系が安定であるための十分条件として引用した。一方、池浦ら⁽¹³⁾は、人間どうしの協調物体運搬動作において、従動側の受動性の変化を調べ、従動側の制御動作をロボットに応用した場合の系内で果たすべき役割を考察した。

区間 $[t_a, t_b]$ における受動性は、次式のように表される。

$$P[t_a, t_b] = \int_{t_a}^{t_b} f(t)\dot{x}(t)dt \geq -e(t_a) \dots\dots\dots (4)$$

また、上の不等式が成り立てば、その区間内では系は受動的であるという。ここで、 $e(t_a)$ は、系がもっていた

Fig. 6 Estimated impedance parameters
(subject YK, $m=0.3$ kg)

Fig. 10 Estimated impedance parameters
(subject TI, $m=0.3$ kg)

Fig. 7 Estimated impedance parameters
(subject YK, $m=0.6$ kg)

Fig. 11 Estimated impedance parameters
(subject TI, $m=0.6$ kg)

Fig. 8 Estimated impedance parameters
(subject YK, $m=0.9$ kg)

Fig. 12 Estimated impedance parameters
(subject TI, $m=0.9$ kg)

Fig. 9 Estimated impedance parameters
(subject YK, $m=1.2$ kg)

Fig. 13 Estimated impedance parameters
(subject TI, $m=1.2$ kg)

初期エネルギーである。なお、 $f(t_a)=\dot{x}(t_a)=0$ とし、受動性の評価区間を小さくすることにより近似的に $e(t_a)=0$ とすることができる。したがって、本研究の実験において初期エネルギーは零としている。

図 14, 15 はそれぞれ被験者 YK, 被験者 TI における 0.1 秒ごとの受動性の変化を示している。図をみてわかるように、受動性は動作を通じて正の値をとり続けており、この系は受動的である。すなわち、近似されたインピーダンス特性を智能機械へ応用しても、知

能機械-人間共存システムは常に安定であることが期待できる。

受動性の変化については、被験者が対象物体の落下を感知して、制御を始めるまでは、受動性は低いものの、動作前半はおもに物体の運動に追従し、(受動性は大きく)、後半部分に向かって受動性が減少するといった傾向が見られる。また、両被験者とも物体の質量が大きいくほど受動性が高い。

図 14, 15 において、受動性の増加から減少への切り

Fig. 14 Changes of passivity (subject YK)

替わりは、慣性の増加と深い関係があることがわかる。すなわち、両被験者とも受動性がピークに達する時刻は推定された慣性が増加し始めてから最大値を過ぎた直後である。このことから本実験において人間が物体の落下を感じ取り実際に制御を始めるのは、見かけの慣性を増加させることをきっかけとしている可能性がある。

受動性の変化のパターンは、上肢2点間運動でみられる速度パターン⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾のような釣り鐘形となり、人間特有の特徴が見られた。このような特性を知能機械-人間共存システムに應用すると、人間は知能機械の運動を違和感なく受け入れることができ、親近感や安心感を抱くことが期待される。

5. 結 言

本研究では、落下する物体をやわらかく静止させる動作について、その制御特性を調べた。その結果、人間は非常になめらかな静止動作を行っており、その速度パターンは、ピークが動作中央からやや前半に位置する釣り鐘形で、物体の質量の増加とともに動作中央方向へ移動し、その値も増加することが確認された。

また、人間の制御動作を時変なインピーダンスモデルで近似することを試みた。その結果、近似されたインピーダンスパラメータの変化は、三つのPhaseに区別できることが明らかになり、それぞれのPhaseにおける人間の制御特性が考察された。

明らかになった人間の制御特性を、知能機械-人間共存システムへ適用することを目指して、受動性について検討した。その結果、人間の制御特性は動作を通じて受動的であり、その変化のパターンは釣り鐘形と

Fig. 15 Changes of passivity (subject TI)

なり、人間特有のエネルギー授受が見られた。これらのことから、明らかになった人間の制御特性を知能機械-人間システムに應用した場合、システムは安定だけでなく、人間は知能機械の運動を違和感なく受け入れることができ、親近感や安心感を抱くことが期待される。

ただし、実験において推定されたインピーダンスパラメータについては定性的な特徴は把握できたものの、物体の質量の変化に伴うパラメータ値の大きさの変化については法則性が見出せず、さらに解析する必要がある。また、知能機械への応用を考えたとき、どのような大きさにインピーダンスパラメータ値を設定すべきかが問題となり、今後の課題としたい。

最後に、本研究に多大なるご協力をいただいた三重大学工学部池浦良淳先生に厚く御礼申し上げる。

文 献

- (1) Mussa-Ivaldi, F. A., Hogan, N. and Bizzi, E., Neural, Mechanical and Geo-metric Factors Subservicing Arm Posture in Humans, *J. Neuro-science*, 5-10(1985), 2732-2742.
- (2) Flash, T., The Control of Hand Equilibrium Trajectories in Multi-joint Arm Movements, *Biological Cybernetics*, 57(1987), 257-274.
- (3) Dolan, J. M., Friedman, M. B. and Nagurka, M. L., Dynamic Loaded Impedance Components in the Maintenance of Human Arm Posture, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23-3(1993), 698-709.
- (4) 辻敏夫・後藤和弘・伊藤宏司・長町三生, 姿勢維持中の人間の手先インピーダンスの推定, 計測自動制御学会論文集, 30-3(1994), 319-328.
- (5) 五味裕章・川人光男, 運動中に変化する腕の機械インピーダンス, 第9回生体・生理工学シンポジウム論文集,

- (1994), 311-314.
- (6) Ikeura, R. and Inooka, H., Variable Impedance Control of a Robot for Co-operation with a Human, *Proc, IEEE Robotics Autom.*, 3, (1995), 3097-3102.
- (7) 池浦良淳・藤井祥央・猪岡光, 手腕系の衝撃吸収特性, 日本機械学会論文集, **60**-580, C(1994), 4123-4129.
- (8) Savitzky, A. and Golay, M. J. E., Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, *ANALYTICAL CHEMISTRY*, **3**-8(1964), 1627-1639.
- (9) 小川鉦一・森政弘, 物体を持った上肢の直線運動パターンの分析, 人間工学会誌, **13**-3(1997), 91-98.
- (10) 柴田論・大場光太郎・猪岡光, 位置決め精度が必要な人間上肢運動に関する実験的考察, 人間工学, **29**-5(1993), 279-288.
- (11) 辻敏夫・三木義民・伊藤宏司, 拘束動作における人間の手先力パターンと仮想軌道仮説, 計測自動制御学会論文集, **28**-3(1992), 366-373.
- (12) 小菅一弘・吉田英博・田口大二・福田敏男, 複数のロボットと人との協調制御, 第11回日本ロボット学会学術講演会, (1993), 753-754.
- (13) 池浦良淳, 森田明司, 水谷一樹, 受動性に基づく人間どうしの協調運搬動作の特性解析, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1996), 373-374.