

解説

パワー増幅ロボットシステム設計概論

—力学的相互作用にもとづく人と機械の相乗効果を実現するために—

Introduction to Power-Amplifying Robot System Design

—For Man-Machine Synergy Based on Physical Interaction of Human and Robot—

金岡 克 弥^{*1*2} ^{*1}立命館大学 ^{*2}マンマシンシナジーエフェクタズ (株)Katsuya Kanaoka^{*1*2} ^{*1}Ritsumeikan University ^{*2}Man-Machine Synergy Effectors Co., Ltd.

1. はじめに

相乗効果は、概して異質な主体の組み合わせによって生じる。人と共働するロボットについて考えよう。限りなく人に近いロボット（それが実現するかどうかは措いて）と言えば聞こえは良いが、それはロボットが人と同質化することであり、人とロボットの共働を目的とする限り、相乗効果を期待すべくもない。むしろ人と異なるロボットの能力を強化することが重要である。ロボットの異能と人の能力を組み合わせることにより、人とロボットの相乗効果への道が拓かれる。

上記のような基本思想にもとづき、我々は「マンマシンシナジーエフェクタ」を提唱している [1]~[3]。これは「人間のみのみ、機械のみでは実現できない高度な機能を、人間と機械の相乗効果（マンマシンシナジー）によって実現する効果器」という概念、およびそのシステムの総称である。

マンマシンシナジーエフェクタの開発において、我々が最初に注目しているロボットの能力はパワーである。人体が発揮できない強大かつ高速高精度なパワーを発揮するロボットと、人間の臨機応変な判断能力/作業計画能力/制御能力を組み合わせることにより、力学的な相乗効果を実用に耐えるレベルで実現することを目指している。

本稿では、人間とロボットとの力学的な相互作用にもとづく相乗効果を、人間パワー増幅ロボットとして実現するためのシステム設計について概説する。

2. パワー増幅ロボットシステムの機構

まず、本稿における設計対象が、パワーアシストロボットではなく、パワー増幅ロボットであることに注意された。梅谷ら（例えば文献 [4] [5] など）は、パワーアシスト

ロボットにおける目標を端的に、機構透明性と表現している。現在開発されているパワーアシストロボットの多くが明示的に、あるいは暗黙のうちにこの概念を基礎としている。そこでは、ロボットとの共働作業において、ロボットダイナミクスを操作者に感じさせないように軽減あるいは補償し、まるでロボットを使わずに作業しているかのような感覚を操作者に与えることが望ましいとされている。

一方、パワー増幅ロボットシステムにおけるシステム設計の目的は、人間パワーを増幅する力学変換器としての適切な変換特性をロボットに賦与することである。以下、その機構設計手法について概説する。

2.1 力学的接続形態

パワー増幅ロボットシステムにおいては、人・ロボット・環境の三者の力学的関係についての考察が必要である。これについては、別稿 [6] にて詳述してあるので参照されたい。

ここでは、人と共働するロボットを人と環境との力学的インターフェースとしてとらえる立場から、直列接続 [6] を採用する。直列接続の概念を図 1 に示す。人間はロボットのみと力学的相互作用をし、環境もロボットのみと力学的相互作用をする。例えば、人間がロボットアームを持ち、そのロボットアームが環境に接触するような場合である。このとき、人間がロボットを駆動する手先力を $f_h(t)$ 、ロボットが環境を駆動する手先力を $f_r(t)$ としている。また、 $q_h(t)$ 、 $q_r(t)$ 、 $q_e(t)$ はそれぞれ、人間、ロボット、環境の変位を表す一般化座標である。 t は時刻を表す。

直列接続では、ロボットのハードウェアとソフトウェアを適切に設計することによって、人間から環境へのロボットによるパワー増幅、環境から人間へのパワー伝達による

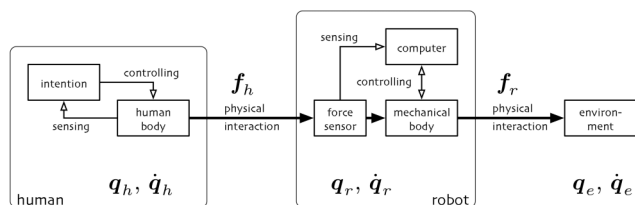


図 1 人・ロボット・環境の直列接続システム

原稿受付 2008 年 2 月 13 日

キーワード: Man-Machine Synergy Effector (MMSE), Man-Machine Interaction, Power-Amplifying Robot, Power-Assist Robot

*1 〒 525-8577 草津市野路東 1-1-1

*2 〒 525-8577 立命館大学テクノコンプレクス内

*1,2 Kusatsu-shi, Shiga

直感的操作性の実現, さらに, 環境から人間への過大なパワー伝達の制限による安全性の確保, という非対称な力学的相互作用が可能となる.

2.2 カセンサ

図1の直列接続システムにおいてパワー増幅を実現するには, 人間の操作力 f_h の情報が必要である. しかし, ロボットから見て f_h と f_r を区別するためには, いずれかを計測する力センサを装備しなければならない.

我々の目的がパワー増幅であることを考えると, 人間の操作力 f_h は繊細で小さく, ロボットの外力 f_r は大きいことが必然である. 一般的な力センサの耐荷重を考えれば, 人間とロボットの間力センサを配置し, f_h を直接計測すべきである. ロボットと環境の間力センサを配置することも不可能ではないが, ロボットが繊細な作業をする場合に限られよう.

また, 力センサを用いずに f_h を推定することも可能である. しかし f_h と f_r を区別するためには, 人間もしくは環境のダイナミクスモデルを必要とする. 人間あるいは環境が既知であるという制約は, たとえノミナルモデルに限定されたとしてもシステムの汎用性を損なう.

つまり, 汎用な人間パワー増幅ロボットシステムには, ロボットの変位 q_r を計測する一般的な変位センサに加えて, 人間とロボットの間力 f_h を計測する力センサが不可欠である.

2.3 ロボットの形状

パワー増幅ロボットの形状設計については, 以下の点に留意すべきである.

形状設計指針

- (1) 概形は人体と相似であることが望ましい (人間型)
- (2) 原則として, 人間とロボットは proximal end と distal end のみで拘束される (緩い拘束)

指針(1)は, 人間型の必然性についての議論である. ヒューマノイドの利点は, 以下の項目に集約されよう [8].

- (A) 人間の環境がそのまま使える
- (B) 人間の使う道具がそのまま使える
- (C) 人間の形をしていることそのものに意味がある

しかし, これらを鑑みても, 工学的見地からのヒューマノイドの有用性には疑問が残る. 上記(C)のような情緒的利点は本特集の趣旨から外れるので措くが, (A)や(B)のように, 自律型ロボットによる人間の代替用途における力学的な作業性について議論するならば, 二腕二脚が最適であるとは言い難い [9][10].

対して我々はパワー増幅ロボットシステムにおける人間と機械の相乗効果を目指している. そこでは, 人間が身体的スキルを発揮しつつ, ロボットを通して間接的に作業を

遂行することが期待されている. 人間と力学的に接続されたパワー増幅ロボットにおいては, 操作者が作業計画を直感的に立案するためには, 自らの身体的スキルを投影しやすい人間型であることが操作しやすさの条件となる.

指針(2)は, 人間の操作力 f_h にもとづく力制御ベースのパワー増幅(後述)を行うための条件である. もし人間とロボットが, いわゆる「スーツ」のように一体化しているならば, $q_h \approx q_r$ となる. 同一自由度で位置制御と力制御を同時に実現することはできないため, 人間とロボットとの一体化という q_h と q_r の拘束は, 力 f_r を制御するための自由度の減少を意味する.

さらに, 力センサによって f_h を漏れなく計測するためにも指針(2)は有効である. この構成であれば, distal end の人間・ロボット間に力センサを配置するだけで f_h を直接計測できる.

以上まとめると, ロボットの形状設計において我々が取るべき方策は, 概形は人間型に近づける一方で, 人間とロボットの一体化を避けるために, f_h と f_r を関連づける必要十分な自由度数のみの拘束を人体の proximal end と distal end に設け, それ以外の不要な幾何拘束は設けないことである.

3. パワー増幅ロボットシステムの制御

直列接続システムにおける人間・ロボット・環境の運動方程式は一般に, 次のように書ける.

$$-J_h^T f_h + \tau_h = M_h \ddot{q}_h + r_h \quad (1)$$

$$-J_r^T f_r + J_r^T f_h + \tau_r = M_r \ddot{q}_r + r_r \quad (2)$$

$$J_e^T f_r + \tau_e = M_e \ddot{q}_e + r_e \quad (3)$$

式(1)は人体, 式(2)はロボット, 式(3)は環境のダイナミクスである. ただし $M_h(q_h)$, $M_r(q_r)$, $M_e(q_e)$ はそれぞれの慣性行列, $r_h(\dot{q}_h, q_h)$, $r_r(\dot{q}_r, q_r)$, $r_e(\dot{q}_e, q_e)$ は慣性項以外の動力学的効果(重力, 粘弾性力, コリオリ力, 摩擦力等)を集約した剰余項である. $\tau_h(t)$, $\tau_r(t)$, $\tau_e(t)$ はそれぞれ人間・ロボット・環境を駆動する一般化力, $J_h(q_h)$, $J_r(q_r)$, $J_e(q_e)$ はそれぞれの関節速度を手先速度へ変換するヤコビ行列である.

以下, このシステムにパワー増幅を実現するための制御則を適用することを考えよう.

3.1 インピーダンス制御 (位置制御ベース)

まず, パワーアシストシステムにおいて多く用いられるインピーダンス制御を適用する. これは, 人間の手先力 f_h に対して, ロボットのダイナミクスを所望のインピーダンスに設定するものである. 所望のインピーダンスは, 例えば以下のように定めることとしよう.

$$J_r^T K_{amp} f_h = M_r \ddot{q}_r \quad (4)$$

\mathbf{K}_{amp} は正のパワー増幅ゲインの対角行列, $\ddot{\mathbf{q}}_{rd}(t)$ はロボット関節変位に関する目標加速度である. ここでは, 所望のインピーダンスを慣性項のみとし, 実際のロボットの慣性行列を保持するとした.

式 (4) をロボットの位置制御によって実現する.

インピーダンス制御則 (位置制御ベース)

$$\ddot{\mathbf{q}}_{rd} = \mathbf{M}_r^{-1} \mathbf{J}_r^T \mathbf{K}_{amp} \mathbf{f}_h \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_{rd} = \int_0^t \ddot{\mathbf{q}}_{rd} dt, \quad \mathbf{q}_{rd} = \int_0^t \dot{\mathbf{q}}_{rd} dt \quad (6)$$

ただし $\mathbf{q}_{rd}(t)$, $\dot{\mathbf{q}}_{rd}(t)$ はそれぞれ, ロボット関節変位と速度に関する目標軌道であり, これらの初期値は簡単のためにゼロとしている. この目標軌道を, 何らかの位置制御手法 (例えば PD 制御等) を用いてロボットに追従させることによって, 所望のインピーダンス (4) を実現できる.

この位置制御が実現され $\mathbf{q}_r = \mathbf{q}_{rd}$ となったとすると, 人間・ロボット系のダイナミクスは所望のダイナミクスそのもの, つまり式 (4) に式 (1) を代入して整理した,

$$\begin{aligned} 0 = & \mathbf{K}_{amp} \mathbf{J}_h^{-T} \boldsymbol{\tau}_h \\ & - \mathbf{K}_{amp} \mathbf{J}_h^{-T} (\mathbf{M}_h \ddot{\mathbf{q}}_h + \mathbf{r}_h) \\ & - \mathbf{J}_r^{-T} \mathbf{M}_r \ddot{\mathbf{q}}_r \end{aligned} \quad (7)$$

となる. ここには外力 \mathbf{f}_r が現れず, 人間・ロボット系は完全に環境を無視したダイナミクスを持つこととなる.

3.2 インピーダンス制御 (力制御ベース)

人間の手先力 \mathbf{f}_h に対して, 同じくインピーダンス制御を適用することを考える. 所望のインピーダンスは, やはり式 (4) とする. ただしここでは, 位置制御にもとづく式 (5), (6) ではなく, 力制御によってこれを実現する.

式 (4) および $\mathbf{f}_r = 0$ を式 (2) に代入して整理すると, 以下の制御則を得る.

インピーダンス制御則 (力制御ベース)

$$\boldsymbol{\tau}_{rd} = \mathbf{J}_r^T (\mathbf{K}_{amp} - \mathbf{E}) \mathbf{f}_h + \mathbf{r}_r \quad (8)$$

ただし $\boldsymbol{\tau}_{rd}(t)$ はロボットへ指令する目標駆動力, \mathbf{E} は単位行列である.

$\boldsymbol{\tau}_r = \boldsymbol{\tau}_{rd}$ が実現されたとすると, インピーダンス制御された人間・ロボット系のダイナミクスは以下ようになる.

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_r = & \mathbf{K}_{amp} \mathbf{J}_h^{-T} \boldsymbol{\tau}_h \\ & - \mathbf{K}_{amp} \mathbf{J}_h^{-T} (\mathbf{M}_h \ddot{\mathbf{q}}_h + \mathbf{r}_h) \\ & - \mathbf{J}_r^{-T} \mathbf{M}_r \ddot{\mathbf{q}}_r \end{aligned} \quad (9)$$

これは, ロボットの手先が, パワー増幅の結果としての外

力 \mathbf{f}_r を発揮する際の各項の寄与を表す. すなわち, ロボットダイナミクスの影響 (右辺第三項) を所望のインピーダンスに補償した上で, パワー増幅 \mathbf{K}_{amp} によって拡大された人のダイナミクスの影響 (右辺第二項) を受けつつ, 増幅された人力 (右辺第一項) をもって手先力 \mathbf{f}_r を発生する.

3.3 力増幅制御則

最後に, 人間の手先力を単純に増幅するようにロボットの駆動力指令を出す, 力増幅制御則を考えよう.

力増幅制御則

$$\boldsymbol{\tau}_{rd} = \mathbf{J}_r^T (\mathbf{K}_{amp} - \mathbf{E}) \mathbf{f}_h \quad (10)$$

この制御則を適用すると, 人間の手先力が \mathbf{K}_{amp} 倍になってロボットの手に作用するのと等価となる.

$\boldsymbol{\tau}_r = \boldsymbol{\tau}_{rd}$ が実現されたとすると, 力増幅制御された人間・ロボット系のダイナミクスは以下ようになる.

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_r = & \mathbf{K}_{amp} \mathbf{J}_h^{-T} \boldsymbol{\tau}_h \\ & - \mathbf{K}_{amp} \mathbf{J}_h^{-T} (\mathbf{M}_h \ddot{\mathbf{q}}_h + \mathbf{r}_h) \\ & - \mathbf{J}_r^{-T} (\mathbf{M}_r \ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{r}_r) \end{aligned} \quad (11)$$

力増幅制御では, ロボットダイナミクスの補償は行われず, そのまま外力 \mathbf{f}_r に影響する (右辺第三項). しかし, やはりパワー増幅 \mathbf{K}_{amp} によって拡大された人のダイナミクスの影響 (右辺第二項) を受けつつ, 増幅された人力 (右辺第一項) をもって手先力 \mathbf{f}_r を発生することとなる.

4. パワー増幅制御則に関する考察

ここでは, マンマシンシナジーを実現するという観点から, 前述の制御則の効果を検討する.

4.1 位置制御ベース vs 力制御ベース

同一の制御目的 (4) を持つインピーダンス制御であっても, 実装手法が位置制御ベースか力制御ベースかによって効果は異なる.

位置制御ベースのインピーダンス制御では, 式 (7) に示したように人間とロボットは環境から切り離される. 人間は, 整形されたロボットダイナミクス (4) は感じるが, \mathbf{f}_r を通じての環境からの力学的相互作用は感じない. これは, 例えば荷物の重さに関係なく「まるで持っていないかのように」取り扱いたい場合には適している. また, 先験的知識を持たずとも非線形なロボットダイナミクスを抑え込めるという利点もある.

一方, 力制御ベースのインピーダンス制御では, 式 (9) に示したように, 人間は整形されたロボットダイナミクス (4) を感じ, さらに \mathbf{f}_r を通じて環境からの力学的相互作用をも感じることができる. つまり, 重い荷物は重く, 軽い荷物は軽く感じつつ, パワー増幅 \mathbf{K}_{amp} によって作業に必要な人間の操作力は縮小されて楽になっている.

力増幅制御も力制御ベースの手法である。式 (11) に示したように、人間はロボットダイナミクス (2) を感じ、 f_r を通じて環境からの力学的相互作用をも感じることができる。やはり、重い荷物は重く、軽い荷物は軽く感じつつ、パワー増幅 K_{amp} によって人間は楽になっている。

マンマシンシナジーを実現するには、人間・ロボット系と環境との力学的相互作用が必須である。したがって、相乗効果を期待して制御則を適用するならば、力制御ベースの制御則が望ましい[†]。

4.2 インピーダンス制御 vs 力増幅制御

力制御ベースのインピーダンス制御則 (8) では、ロボットダイナミクスの一部、例えば r_r を既知としている。これは、ダイナミクスのソフトウェア上での整形によって、人間が操作しやすいように調整することを可能とする。

力増幅制御則 (10) は、ダイナミクスの先験的知識を必要とせず、実装が簡単である。しかし、ロボットダイナミクスがそのまま式 (11) に残るため、人間が操作しやすいように調整するにはハードウェアを作り込む必要がある。

しかし、必ずしもダイナミクスの整形が、人間にとっての操作しやすさに直結するわけではない。パワー増幅制御に求められるのは、インピーダンス制御則と力増幅制御則の中間的な手法であろう。すなわち、 r_r をすべて補償するのではなく、まずはハードウェアを作り込んで r_r を適切に設計しておき、その後 r_r の一部の効果 (重力項等) のみを式 (8) に付加し、ハードウェアとソフトウェアの双方からロボットダイナミクスの整形を行う、という手法である。

5. おわりに

パワー増幅ロボットシステム設計について、ハードウェア、ソフトウェアの両面から概説した。しかし、本稿での議論に加えて、さらに人間・環境のダイナミクス、および人間が行う制御 (操作) を具体的に決定しなければ、人間・ロボット・環境システムの制御ループは閉じず、制御性能についての議論も中途半端となる。

人間・ロボット・環境システムの閉ループダイナミクスの安定性については、我々が提案する制御系設計手法である仮想パワーリミッタシステム [11] によって保証することができる。本稿での議論は、すべて仮想パワーリミッタシステムの導入を暗黙の前提としている。

しかし、安定性以外の制御性能については、現状では「人任せ」、すなわち人間のスキルに完全に依存している。これは、人間にスキルを要求し、誰でもうまく扱えるとは限ら

ないという意味で、人に厳しいシステムである。

次世代ロボットの属性として語られる「人にやさしい」とは「何でも言うことを聞き、何でも人の代わりにやってくれる、都合の良いともだち (奴隷?) ロボット」を意味するのであろうか。このようなロボットは、技術的困難もさることながら、真綿で首を絞めるように人間をスポイルしていくと筆者は考えている。我々のマンマシンシナジーエフェクタは「強大な力学的能力を使いやすい道具として人に提供することにより、人に高いスキルを要求し、重い責任を課すが、結果的に人の成長とロボットの発展を促す」ための研究開発としたい。読者諸賢のご意見・ご批判を賜りたいところである。

謝辞 本 MMSE プロジェクトは現在、知的クラスター創成事業、岐阜・大垣地域ロボティクス先端医療クラスターにて研究開発が継続されている。

参考文献

- [1] 金岡：“マンマシンシナジーエフェクタ (人間機械相乗効果器) ~人と機械のシナジーを目指して~”，ロボット, no.162, pp.11-15, 2005.
- [2] K. Kanaoka: “The Concept of Man-Machine Synergy Effector,” Proc. Int. Symp. on Robotics, TH 2C OS: Experiential-type Robots, 2005.
- [3] 金岡：“マンマシンシナジーエフェクタの概念 仮想パワーリミッタシステムによるマンマシンシナジーの実現”，計測自動制御学会 SI 部門講演会講演論文集, pp.887-888, 2005.
- [4] 梅谷：“宇宙船外作業およびフィールドワーク用の補装知能機械「スキルメイト」の開発”，日本ロボット学会誌, vol.19, no.8, pp.950-954, 2001.
- [5] 山田, 森園, 梅谷：“宇宙用ウェアラブルロボット”，日本ロボット学会誌, vol.20, no.8, pp.816-818, 2002.
- [6] 金岡：“マンマシンシナジーを実現するフィジカルインタラクションに関する一考察”，計測自動制御学会 SI 部門講演会講演論文集, pp.370-373, 2006.
- [7] H. Seki, M. Iso and Y. Hori: “How to Design Force Sensorless Power Assist Robot Considering Environmental Characteristics —Position Control Based or Force Control Based—,” Proc. IEEE IECON, pp.2255-2260, 2002.
- [8] 梶田：ヒューマノイドロボット, pp.1-2, オーム社, 2005.
- [9] 広瀬, 米田：“実用的 4 足歩行機械の開発に向けて”，日本ロボット学会誌, vol.11, no.3, pp.360-365, 1993.
- [10] 広瀬：“ヒューマノイドから機械知能発現型ロボットへ”，日本ロボット学会誌, vol.16, no.5, pp.607-611, 1998.
- [11] 金岡：“仮想パワーリミッタシステムによる人間パワー増幅システムの実現”，第 9 回ロボティクス・シンポジウム予稿集, pp.260-263, 2004.



金岡克弥 (Katsuya Kanaoka)

2002 年京都大学大学院工学研究科博士後期課程研究指導認定退学。同年立命館大学理工学部ロボティクス学科助手, 2003 年同学科講師。2007 年同大学発ベンチャー, マンマシンシナジーエフェクタズ株式会社を設立, 代表取締役社長に就任, 現在に至る。パワー増幅ロボット, 空中/水中ロボット, 歩行ロボットの研究に従事。博士 (工学)。日本機械学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

[†]位置制御ベースでも、ロボットと環境の間に力センサを実装するか、あるいはオブザーバを構成すれば、外力 f_r を導入できる。しかしながら、ロボットと環境の間には大きな力が作用するため、力センサの配置は適切ではない。オブザーバを構成するにもロボットのモデルが完全に既知でなければならず、ロボットが自由度・非線形化するにつれて実装は困難となる。