I. テレオペレーションにおける力の計測と制御

キーワード

テレオペレーション, グラインダ作業ロボット, マスタスレーブマニピュレータ, 力制御, バイラテラル制御

松日楽 信 人

神 野 誠

(株)東芝 研究開発センター

1. はじめに

テレオペレーションとして昔から原子力分野を対象として、人間が離れた場所から遠隔操縦するマスタスレーブマニピュレータ(MSM)が研究されてきた。最近では、宇宙空間での作業や電力向け配電作業などにも応用が盛んである⁽¹⁾。

ロボットの操縦には、通常ジョイスティックがよく用いられている。しかし、ロボットで繊細な作業を行うには位置指令や速度指令を与えるだけでは、作業対象やロボット自身に過負荷によるダメージを与えてしまうので、作業対象との接触力を制御しなければならない。これを考慮したロボットの操縦として、次の二つが考えられる。

(1) 力制御型ロボットを用いたジョイスティック操作

通常、ジョイスティックでの操作はオペレータに力を返す必要がなく、モータなどのアクチュエータがいらないので非常に構成が簡単である。しかし、ロボットの位置を操作するだけなので、ロボット側での力制御が必要となる。この場合、オペレータは力加減などが不要で操作が容易となる。このため、MSMにおいてもジョイスティック的な操作モードを有しているものもある。

(2) バイラテラル型 MSM 操作

MSM のバイラテラル制御には対称型、力逆送型、力帰還型が代表的である。これらの制御によれば、マスタアーム(マスタ)からスレーブアーム(スレーブ)に動作を伝えるだけでなく、スレーブに加わる力をマスタに返すこともでき、オペレータは力感覚のあるロボットの操縦が可能となり、繊細な作業ができる。

以上、二つの方式ともに力を計測し、制御に取り入れることで操縦型ロボットシステムの性能を大幅に向上させることを目的としている。本解説では、これらに該当するロボットとして遠隔グラインダ作業ロボットと MSM を紹介し、最後に将来のテレオペレーションについて述べる。

2. 遠隔グラインダ作業ロボット

グラインダ作業は力制御されていなければ実現が困難な

作業の一つである。図1、図2に補修作業用に開発された円筒座標型の遠隔グラインダ作業ロボットの外観と制御ブロック図を示す⁽²⁾。MSM でも作業はできるが、グラインダの姿勢や押付け力を一定に保ったり、ゆっくりと均一に動かすのは操作が大変である。そこで、ジョイスティック操作により動作方向のみを指令し、グラインダの姿勢や押付け力は6軸力センサを用いて自律的に制御している。

2.1 押付け力の制御

例えば、ワークに一定の力で押し付けるには、ワークの法線方向の反力を F_{cz} 、目標の押付け力を F_{cd} とすると、ワークの法線方向の目標位置 $Z_{cd(n)}$ は次式により修正される。

$$Z_{cd(n)} = K_{fz}(F_{cd} - F_{cz}) + Z_{cd(n-1)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 K_{fz} は力制御ゲイン、 $Z_{cd(n-1)}$ は1サンプリング前の法線方向の目標位置である。なお、サンプリング周期は5msである。この方式では位置制御への切換えも容易である。

2.2 モーメントによる力検出

一般に力制御を行う場合には、力センサに作用する並進方向の押付け力を検出しているが、同時にグラインダの慣性力などのノイズも検出される。従来は、このノイズの影響で力制御ループのゲインが上げられず、力の応答性が非常に悪かったが、ここではノイズの影響を簡単に除去する方法を採用している。グラインダ作業の場合、押付け方向(ワーク法線方向)とその反力を受ける位置(砥石先端部)

図1 グラインダ作業ロボット

Force Information Processing and its Application.
I. Force Sensing and Control for Teleoperation.
By Nobuto Matsuhira and Makoto Jinno (R & D Center, Toshiba Corporation)

図 2 グラインダ作業ロボットの力制御

図 3 座標系

図 4 グラインダ作業時の応答

が限られていること、また、ロボットの動作によって発生する慣性力などは、回転方向に比べて並進方向が支配的であることに注目し、図 3 に示すようなグラインダの重心回りに働くモーメントから押付け力を検出している。この方法により、慣性力の影響が除去でき、図 4 に示すように従来の方法よりも 10 倍以上、力制御のゲインが向上している。また、本ロボットでは計測した力情報から次のような作業を可能とする制御方法を採用し、ロボットの性能を向上している。

2.3 未知曲面の研削

グラインダに固定した座標系に対してグラインダを移動させることにより、グラインダ姿勢が曲面形状とずれたときに生ずるわずかな押付け力の変化から、グラインダとワークとの相対姿勢を推測し姿勢を自動的に変化させることが可能である。従って、教示が正確でなくても容易に未知曲面のワーク形状にならうことができる。

2.4 指定形状への仕上げ

ならうだけでは指定形状へ仕上げることはできないが、位置制御と力制御を切り換えることで効率的に作業することが可能である。図 5 では、ワーク形状が指定形状に達した部分で力制御から位置制御に切り換わっているのがわかる。

図 5 円筒形状への仕上げ

3. マスタスレーブマニピュレータ

次に、冗長関節をもつ 7 自由度スレーブとパンダグラフを利用した汎用マスタとからなる MSM を紹介する⁽³⁾。図 6 に写真を示す。ここでは仮想内部モデル⁽⁴⁾を用いた対称型バイラテラル制御方式と小型・軽量のマスタ機構により操作性を向上している。

3.1 カセンサの配置

力の検出方法としては、先端に 6 軸力センサを配置する方法と、各関節に力センサを配置する方法とがある。6 軸力センサは扱いが容易で先端での負荷を正確に計測できるが、製作するにはドリフトや校正など、調整が困難である。一方、各軸力センサは製作が容易であり、先端以外にも負荷を感じることができるが、アーム姿勢や摩擦の影響を受け正確な負荷計測は困難である。組み込む場合には、取付け精度も測定値に影響し、中心がずれていると回転むらとなり検出される。図 7 では減速機の振動も検出されている。MSM では人間が反力を感じ取るので必ずしも正確な反力を必要としないが、ノイズや振動をひろったり、ドリフトやオフセットがあると、マスタに不快な反力が発生し、操作性が低下する原因となる。

3.2 仮想対称型バイラテラル制御

MSM では、通常スレーブに加わる力がマスタへの力の目標値となり制御されているが、このような力帰還型では位置制御系と力制御系が直列に構成されているので、その位相遅れのために不安定になりやすい。そのために、並列

図 6 MSM

図 7 検出トルク例

図 8 仮想内部を用いたバイラテラル制御

に構成する方式などが提案されているが⁽⁵⁾，ここでは図8に示す仮想内部モデルを用いた対称型バイラテラル制御方式を採用している。この方式では，マスタとスレーブへの指令値を同時に生成するとともに，各モデルのパラメータを変更することで安定性や操作性を向上させることができる。モデルの運動を(2)式に示す。また，異構造のシステムなので力，位置，速度を共通座標系に座標変換しバイラテラル制御を行っている。

$$\left. \begin{aligned} F_m - \tau &= M_m \ddot{r}_m + C_m \dot{r}_m \\ F_s + \tau &= M_s \ddot{r}_s + C_s \dot{r}_s \\ \tau &= K_p(r_m - r_s) + K_v(\dot{r}_m - \dot{r}_s) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで， F ， M ， C はそれぞれ操作力/作用力，質量，粘性係数である。 r ， τ は目標位置とモータトルクである。 K_p ， K_v は仮想モデルの位置と速度の制御ゲインである。

3.3 操作性

本 MSM では，作業内容によりバイラテラル MSM 操作 (MS モード) と力制御型ジョイスティック操作 (JS

図 9 力反射 (Y 軸)

図 10 ハンドル回し作業

モード) とを切り換えて使用できる。MS モードでは座標変換を介し，スレーブからマスタに負荷および力反射率に応じて図9に示すように力が発生しているのがわかる。また，図10に示すようにMS，JSモードともにハンドルを回すような拘束性のある作業も作業対象に大きな負荷をかけずに実現することができる。更に，ピン挿入では0.02 mm 以下の隙間に対しても作業が可能である。これらは力感覚が必要とされている作業である。

4. 将来のテレオペレーション

テレオペレーションへの二つのアプローチを示したが，どちらも力情報の活用が重要である。遠隔グライディング作業ロボットは人間の操作の負担を減らすテレオペレーションであり，作業対象との干渉力の制御に力情報が用いられている。このアプローチは半自動的な作業には適している。車両補修⁽⁶⁾や航空機の窓清掃ロボット⁽⁷⁾にも適用研究された。一方，MSM は操作感を人間に返すテレオペレーションであり，力情報は主に人間との情報交換として用いられている。人間の巧妙な動作や判断が必要なところでは後者が重要であるが，テレオペレーション全体を見ると，ともに必要な技術である。今後，より臨場感を人間に与えるためのトレイグジスタンス技術や仮想体験ができるバーチャルリアリティ技術と⁽⁸⁾，知能を取り入れた自律制御技術などとの融合により，将来のアドバンスドテレオ

(a) ローカル制御型テレオペレーション

(b) バイラテラル型テレオペレーション

(c) 自律/遠隔融合型テレオペレーション

図 11 テレオペレーションの分類

ペレーションへの発展性が考えられる。

また、人間とのインタラクティブな情報のやり取りに関する技術も重要である。例えば力情報の活用としては、触覚などの感覚情報は MSM にもまだまだ有効に活用されていない。人間の手は巧妙であり、腕よりも感覚器が多いにもかかわらず、ロボットとしては握力を人間に返す程度である。センサ付きグローブを装着して手の動きを計測し表現することはできて、感覚を簡単に提示するには至っていない。巧妙な動きをロボットに伝えるばかりではなく、手での繊細な感覚を計測・提示できる技術が必要である。将来、マイクロマシンにおける微細組立てや、離れたところからの診断・検査・手術などにおいても、感覚フィードバックを取り入れたファインテレオペレーションが必要となるだろう。

5. おわりに

テレオペレーションの代表的なアプローチとして、グライнда作業ロボットと MSM について紹介した。今後、アドバンスドテレオペレーション技術の研究発展とともに、3K 作業などへの積極的な実用化を期待したい。

(平成 7 年 7 月 6 日受付)

文 献

- (1) 例えば、横山・和気：「架空配電作業用マニピュレータシステムの開発」, 電学論 B, 111, 1159 (平 3-1)
- (2) 神野・吉見・阿部：「遠隔グライнда作業ロボットの研究」, ロボット学誌, 10, No. 2, 244 (平 4)
- (3) 松日楽・朝倉・番場・植之原：「高性能マスタスレーブマニピュレータの開発」, 第 2 回ロボットシンポジウム, p. 145 (平 4)
- (4) 古田・小菅・塩手・秦野：「仮想内部モデルに基づくマスタ・スレーブマニピュレータの制御」, 計測自動制御学論, 24, No. 2, 176 (昭 63)
- (5) 宮崎・萩原：「バイラテラル・マスタ・スレーブマニピュレータの並列制御方式」, ロボット学誌, 7, No. 5, 446 (平元)
- (6) 神野・吉見・前田・千葉・小野：「グライнда作業ロボットの適用研究 第 3 報」, 第 11 回ロボット学会学術講演会, p. 183 (平 5)
- (7) 松丸・松日楽：「風防ガラス・クリーニング・ロボットの開発」, ロボット学誌, 12, No. 5, 743 (平 6)
- (8) 特集：「ヒューマン・インターフェース技術の新展開」, 計測と制御, 30, No. 6 (平 3)

松日楽 信 人 1956 年 9 月 9 日生。1980 年東京工業大学機械物理工学科卒業。1982 年同大学大学院修士課程（機械物理工学専攻）修了。同年（株）東芝入社。マスタスレーブマニピュレータなど遠隔操作ロボットの研究開発に従事。現在、研究開発センター、機械・エネルギー研究所、主任研究員。1994 年度日本機械学会 ROBOMECH 賞受賞。日本機械学会、計測自動制御学会、日本ロボット学会会員。

神 野 誠 1960 年 7 月 29 日生。1983 年慶応義塾大学機械工学科卒業。1985 年同大学大学院修士課程（機械工学専攻）修了。同年（株）東芝入社。グライнда作業ロボットなどロボットの機構およびシステムの研究開発に従事。現在、研究開発センター、機械・エネルギー研究所、研究主務。1994 年度日本機械学会技術奨励賞受賞。日本機械学会、日本ロボット学会会員。