搬送時の把持物体姿勢を考慮した把持点探索アルゴリズムの提案

A proposal that an algorithm of searching for grasping points considering the pose of grasping object at transportation

○学 森田一輝（中央大） 学 太田諒（中央大）
正 大隅久（中央大） 正 田村雄介（中央大）

Kazuki MORITA, Chuo University, morita@arc2.mech.chuo-u.ac.jp
Ryo OTA, Chuo University, ota@arc2.mech.chuo-u.ac.jp
Hisashi OSUMI, Chuo University
Yusuke TAMURA, Chuo University

A transportation system by cooperation of several manipulators has been developed until now. In this report, a practical method of determining grasping points of manipulators is proposed so that the maximum loads for each manipulator shouldn't exceed the payload capacity of the manipulators. First, we propose a searching scheme for grasping points so as not to exceed the load capacity for arbitrary trajectories of position and orientation of the transported object. Then, we verify the effectiveness and efficiency of the scheme by simulations.

Key Words: Cooperative object transportation, Multiple manipulators, Load capacity, Grasping points

1. 緒言

近年の変種変量生産による頻繁な製造ラインの変更に対応するため、マニピュレータの汎用性の向上や、複数台による協調作業の実現が求められている。本研究では汎用性向上を目的として全方向移動マニピュレータを開発した。さらに汎用性を高めるため、この移動マニピュレータを複数台用いた位置制御による協調搬送の実現を目指す。

しかし、実際に協調搬送を実現させるためには主に以下に示す2つの問題点がある。1つが手先位置誤差による内力の発生、2つ目がマニピュレータ手先と対象物重心の位置関係から生じる負荷の偏りである。内力の発生を抑制するための研究として、ハイブリット制御法[1]や、インピーダンス制御等が提案されている[2]。それに対し、本研究ではマニピュレータ手先に受動関節機構を導入することで内力の発生を抑制している。本機構を導入することで、マニピュレータの手先位置制御のみで協調を実現している[3]。一方、負荷の偏りの問題点を解決する方法として、各マニピュレータに加わる負荷が均等となる把持点を探索する手法が提案されているが、対象物の姿勢が搬送中変化しないことを想定している[4]。しかし、対象物が傾くと各マニピュレータに加わる負荷に偏りが生じ、負荷がマニピュレータの許容負荷を超える可能性がある。そこで本論文では、協調搬送時に対象物の姿勢変化を考慮し、軌道全体で許容負荷を超えない把持点を探索する手法を提案する。

2. 協調システム機構

2.1 全方向移動マニピュレータ

本研究では図1に示す全方向移動マニピュレータを3台使用している。台車にはOmni-wheelが90°位相で4つ取り付けられ、それぞれ独立に駆動する構造となっている。これらによって全方向に移動できる台車となり、その上にロボットアーム（安川電機製）を搭載することで高い自由度を得ている。

2.2 受動関節機構

手先位置誤差による過大な内力の発生を抑制するためには、複数のロボットと1つの対象物からなる協調系に適切なコンプライアンス機構を導入する必要がある。そしてサーボ剛性

無限大のPID制御位置制御系で協調制御を実現するには、対象物に課す幾何拘束ベクトルが6つであり、それぞれが一次独立な関係である必要がある[3]。この協調条件を満たすには、マニピュレータを3台用いる場合12個のアクチュエータを持たない受動関節が必要であり、本研究では図2に示す受動関節機構を各マニピュレータ手先に導入している。これにより、各手先位置を制御するだけで、手先位置誤差が発生しても幾何的に誤差を吸収し、協調を実現することができる。

本研究で導入した受動関節機構は、構造上の理由から手先にどのような変位が生じて受動第2関節の位置は変わらない。ゆえに手先に加わる負荷 $\mathbf{F}$ はすべて受動第2関節に加わるとみなせる。また、その負荷は、図3に示す受動第2、3リンクに沿う方向ベクトル $\mathbf{e}_1$ と受動第2関節軸方向ベクトル $\mathbf{e}_2$ の2つの拘束ベクトルで表される。この2つのベクトルを含む平面を幾何拘束平面と呼び、受動関節機構に加わる負荷は幾何拘束平面に沿う力となる。

手先に受動関節機構が取り付けられたマニピュレータを複数台用いて対象物を把持する場合、各受動第2関節に加わる負荷の z 成分の合計は力のつりあいにより受動第2関節角度によらず一定である。しかし、受動第2関節に加わる負荷は幾何拘束平面に沿うため、受動第2関節角度が変化すると各受動第2関節に加わる負荷の合計も変化する。この負荷の合計が最小となるのは幾何拘束平面が地面に対して垂直となるときであり、このときの姿勢を最適姿勢とする。本論文では受動関節の姿勢は常に最適姿勢であるとする。

Fig.1 Omni-directional mobile manipulator

Fig.2 Passive joint mechanism

Fig.3 Geometric constraint force vectors

3. 負荷偏りの重ね合わせ

3.1 原理

3 台の移動マニピュレータを用いて協調搬送をする場合、対象物姿勢を変化すると各マニピュレータに加わる負荷に偏りが生じる。そのため、ある目標姿勢が与えられ対象物を回転させるときに各受動第 2 関節に加わる負荷が許容負荷以下となる把持点を探索するには、まず回転後の各受動第 2 関節に加わる負荷を導出する必要がある。これは、オイラー角や一軸回転法などを用いて回転角度を求め、各受動第 2 関節の位置を導出し、力、モーメントのつり合いにより求めることができる。しかし、この方法だと多少手間がかかってしまう。そこで、より簡単に回転後の各受動第 2 関節に加わる負荷を導出する方法を提案する。

例えば、図 4 (a) に示したように、ある初期姿勢から目標姿勢まで物体を回転させ、回転後の各受動第 2 関節に加わる負荷の導出を考える。ここで、初期姿勢から目標姿勢を達成させるために必要な基準座標系 x 軸まわりの回転角度を θ 、基準座標系 y 軸まわりの回転角度を φ とする。そして初期姿勢から基準座標系 x 軸まわりに θ 回転させたとき (図 4 (b)) の負荷の偏りと、初期姿勢から基準座標系 y 軸まわりに φ 回転させたとき (図 4 (c)) の負荷の偏りを重ね合わせる。そうすることで、回転後の各受動第 2 関節に加わる負荷の近似値を導出する手法である。

3.2 シミュレーション

搬送物体を長方形平板と想定し、重心を原点とする x - y - z 座標系をとり、基準座標系の x , y 軸まわりに θ , φ 回転させるときの回転行列をそれぞれ $R_x(\theta)$, $R_y(\varphi)$ とすると初期姿勢から基準座標系における x 軸まわりに θ 回転させ回転後の姿勢から基準座標系における y 軸まわりに φ 回転させるときの回転行列は $R_y(\varphi) R_x(\theta)$ で表される。また、任意の初期姿勢時にマニピュレータ i の受動第 2 関節に加わる負荷を f_i 、初期姿勢に回転行列 $R_x(\theta)$, $R_y(\varphi)$, $R_y(\varphi) R_x(\theta)$ を施した後のマニピュレータ i の受動第 2 関節に加わる負荷をそれぞれ f_{xi} , f_{yi} , f_{xyi} とする。初期姿勢に回転行列 $R_y(\varphi) R_x(\theta)$ を施した際のマニピュレータ i の受動第 2 関節に加わる負荷の偏り δ_i と、回転行列 $R_x(\theta)$, $R_y(\varphi)$ を独立に施し、それぞれの負荷の偏りを重ね合わせた δ'_i はそれぞれ式 (1) と式 (2) のように表される。式 (3) は δ_i と δ'_i の差で

ある。

(a) Rotation of an object

(b) Rotation around the x axis

(c) Rotation around the y axis

Fig.4 Superposition of the Bias of the Load

Table 1 Parameter

Load of the Grasping Object	Angle of Rotation	(X_1, Y_1, Z_1)	(X_2, Y_2, Z_2)
9.00[N]	0~0.79[rad]	(-150, -250, 0)	(150, 250, 0)

Table 2 The coordinates of the initial grasping points

(x_1, y_1, z_1)	(x_2, y_2, z_2)	(x_3, y_3, z_3)
(0, 250, 0)	(150, -155, 0)	(-150, -155, 0)

Fig.5 The difference of the bias of the load

$$\delta = (f_{xi} - f_i) + (f_{xyi} - f_{xi}) \quad (1)$$

$$\delta' = (f_{xi} - f_i) + (f_{yi} - f_i) \quad (2)$$

$$\varepsilon_i = (f_{xyi} - f_{xi}) - (f_{yi} - f_i) \quad (3)$$

今回シミュレーションに用いるパラメータを表 1 に示し、初期姿勢時の各把持点の座標を表 2 に示す。対象物は 300×500[mm]の長方形平板である。本論文では対象物重心位置を基準座標系中心と定義したため、長方形平板の対角点(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2)により重心位置が定まる。また、マニピュレータ i の把持点座標を(x_i, y_i, z_i)、初期姿勢は地面と平行、受動第 2, 3 リンク合計長さを受動第 4 リンク長さはそれぞれ 100[mm], 60[mm]とする。なお、 θ と φ の組合せが非常に多くなるため、 $\theta = \varphi$ とし、シミュレーション結果を図 5 に示す。

図 5 をみると、回転角度が小さいほど ε_i は小さくなっており、回転角度が 0.52[rad]前後で ε_i は 5[%]以内となった。この結果は初期姿勢時の把持点の組合せによって多少異なるが、どの把持点においても回転角度が小さいほど ε_i は小さくなり、複数の把持点において比較を行ったところ、同様に回転角度が 0.52[rad]前後で ε_i は 5[%]以内となった。

ε_i がどのくらい小さければこの手法を適応できるかについては、マニピュレータの性能や対象物荷重など、使用環境によって異なるため一概には言えない。本論文では、 ε_i が 5[%]以内ならば適応可能とし、負荷偏りの重ね合わせを利用して把持点を探索する。

4. 回転角度導出方法

負荷偏りの重ね合わせを用いて各受動第 2 関節に加わる負荷を導出するには、与えられた目標姿勢を達成させるために必要な基準座標系の x, y 軸まわりの回転角度を導出する必要がある。そのため、ここでは回転角度導出方法について述べる。

目標姿勢を達成させるために必要な回転角度は一軸回転法やオイラー角、ロール・ピッチ・ヨー角などを用いることで導出することができるが、これらで導出される回転角度は基準座標系の x, y 軸まわりの回転角度ではない。そのため、基準座標系の x, y 軸まわりの回転角度の導出方法を考える。

基準座標系の z 軸まわりに β 回転させるときの回転行列を $\mathbf{R}_z(\beta)$ とする。ここで、回転行列の掛け算は左から掛けるか右から掛けるかで意味が異なり、右から掛けていくことで基準座標系における回転軸の回転で考えることができる。従って、 $\mathbf{R}_z(\beta) \mathbf{R}_y(\varphi) \mathbf{R}_x(\theta)$ という回転行列を考えると、これは、まず基準座標系の x 軸まわりに θ 回転させ、回転後の座標系を基準座標系の y 軸まわりに φ 回転させ、さらに回転後の座標系を基準座標系の z 軸まわりに β 回転させるといった意味を持つ。

よって、上述した回転行列と目標姿勢を用いることで θ, φ, β を導出することができる。なお、基準座標系の z 軸まわりの回転は各受動第 2 関節と対象物重心の位置関係が変わらないため各受動第 2 関節に加わる負荷には影響しない。従って、以降の把持点探索では θ, φ を用いる。

5. 把持点探索

5.1 前提条件

搬送中の対象物姿勢の変化を考慮し、対象物を傾けても各マニピュレータに加わる負荷が許容負荷を超えないような把持点を探索するにあたっての前提条件を以下に示す。

- 対象物体形状は長方形平板で、重心は既知かつ物体中心座標とする。
- 把持点はそれぞれ異なる辺。
- 受動関節機構は最適姿勢で把持する。
- 把持する際は対象の辺に対して受動関節機構は直交する姿勢で把持する。

5.2 探索アルゴリズム

以下に負荷偏りの重ね合わせを利用して各受動第 2 関節に加わる負荷が許容負荷以下となるような把持点を探索するアルゴリズムを示す。

- (1) 負荷データベースの作成。複数の把持点組合せにおいて初期姿勢に回転行列 $\mathbf{R}_x(\theta)$ と $\mathbf{R}_y(\varphi)$ を独立に施したときの各受動第 2 関節に加わる負荷を求め、その負荷のデータをデータベースに入れる。ただし、 θ, φ は目標軌道として与えられる可能性のある範囲を全て含むものとする。
- (2) 上述した回転角度導出方法により、与えられた目標姿勢を達成するために必要な基準座標系の x, y 軸まわりの回転角度を導出する。
- (3) 導出した回転角度とデータベース内の負荷のデータを用いて負荷偏りの重ね合わせを行い、目標姿勢時の各受動第 2 関節に加わる負荷の近似値を導出する。
- (4) 初期姿勢時 (図 6(a)), 目標姿勢時 (図 6(b)) の各受動第 2 関節に加わる負荷のなかで最大のものを F とし、予め用意していた把持点の組合せ全てにおいて (3) と (4) を繰り返し、 F を導出する。
- (5) F が最小となるとき把持点の組合せが最適となる。

なお、手順(1)は目標姿勢を変える度に行う必要はなく、目標姿勢を変える場合は手順(2)からとなる。

5.3 シミュレーションによる把持点探索

提案手法の有効性を確かめるためにシミュレーションを行う。

300×500[mm]の長方形平板を受動関節機構が取り付けられた 3 台の移動マニピュレータによる協調搬送を想定し、許容負荷を超えずに任意の目標姿勢を達成することができる把持点の探索を行う。ここで、初期姿勢は地面と平行、目標姿勢は方向ベクトル($1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2}, 0$)まわりに 0.52[rad]回転させた姿勢とする。なお、今回は把持点の組合せ 100 パターン、回転角度 θ, φ が -0.79~0.79[rad]間で 0.087[rad]刻みの 19 パターンにおいて各受動第 2 関節に加わる負荷のデータを用意した。シミュレーションに必要なパラメータを表 3 に示す。

また、初期姿勢時にマニピュレータ i に加わる負荷を f_i 、目標姿勢時にマニピュレータ i に加わる負荷を f_i' とする。今回の提案手法により求めた把持点の組合せを表 4 に示し、そのときの f_i と f_i' 、同じ把持点の組合せで負荷偏りの重ね合わせを利用せずに求めた真の値 f_i と f_i' を表 5 にまとめた。

表 5 をみると初期姿勢時、目標姿勢時の各受動第 2 関節に加わる負荷のなかで最大のもの F が表 3 に示した許容負荷以下となっており、シミュレーションにて許容負荷を超えずに任意の目標姿勢を実現する把持点の組合せを導出できたことが確認できる。この F は予め用意しておくデータが多ければ多いほど小さい値が導出される。

また、表 5 より負荷偏りの重ね合わせを利用した場合と利用しない場合では負荷の差が約 11[%]と非常に小さくなった。よって、今回の提案手法は有効だと言える。

(a) An initial pose (b) A target pose

Fig.6 The loads exerted on each 2nd joint

6. 結論

協調搬送において許容負荷を超えることなく目標姿勢を達成することができる把持点の探索アルゴリズムを提案した。今回は対象物体形状を長方形と想定したが、任意形状に対しても予めデータベースを作成することで適応できる。さらに、受動第2関節に加わる負荷の導出過程も提案した負荷偏りの重ね合わせを利用することで、より容易に求めることができるため応用性は高いと言える。

現段階では、対象物を2次元形状のものとして考えているため、この理論を3次元に拡張していくことが今後の課題である。また、目標姿勢を達成させるのに必要な回転角度が大きい場合でも適応できるような探索アルゴリズムの提案も課題である。

文 献

- [1] 吉川恒夫：“ロボットアームの位置と力の動的ハイブリット制御（手先拘束の記述と関節駆動力の算出）”，日本ロボット学会誌，Vol.4，No.4，pp.3-17，1985.
- [2] 小菅一弘，吉田英博，福田敏男，蟹谷清，酒井勝，針木和夫：“インピーダンス制御に基づく双腕マニピュレータの協調制御”，日本ロボット学会誌，Vol.13，No.3，pp.404～410，1995.
- [3] 大隅久，加賀谷学，相山康道：“3台の産業用ロボットによる協調制御システムの開発（受動関節機構の特異姿勢の導出）”，日本機械学会論文集，Vol.74，No.748，pp.159～167，2008
- [4] 太田諒，大隅久，田村雄介：“複数のマニピュレータを用いた協調把持における負荷均等化把持点探索”，日本ロボット学会誌，211-01，2013.

Table 3 Parameter for the simulation

Load of the Grasping Object	The Permissible Load
9.00[N]	3.3[N]

Table 4 The simulation results (grasping point)

(x_1, y_1, z_1)	(x_2, y_2, z_2)	(x_3, y_3, z_3)
(0, 250, 0)	(150, -50, 0)	(-150, -200, 0)

Table 5 The simulation results (load)

	Superposition of the Bias of the Load	
	Apply	Does Not Apply
(f_1, f_2, f_3) [N]	(2.59, 3.21, 3.21)	(2.59, 3.21, 3.21)
(f_1', f_2', f_3') [N]	(3.16, 2.69, 3.15)	(3.19, 2.62, 3.19)