

逆運動学マップで制御する冗長ロボットを用いた

飛翔物体の捕獲の研究

On a tracking of flight object using redundant DOF robot controlled by inverse kinematics map

宮田 郁子[†] 安藤 英由樹^{††} 平松 誠治^{†††} 加藤 厚生^{†††}

Ikuko MIYATA[†], Hideyuki ANDO^{††}, Seiji HIRAMATSU^{†††} and Atsuo KATO^{†††}

Abstract: This paper describes about high-speed control of redundant degree of freedom (DOF) robot. In general it is very difficult to solve inverse kinematics of redundant DOF robot. For the purpose of it we try to use inverse kinematics map with diffusion equation method and error correcting method. The inverse kinematics map is calculated in offline. Some examinations are made on a real robot manipulator. Sometimes the desired end point of the manipulator does not fit with calculated lattice point. Then, the mapping points have to be recalculated for correcting. We use two artificial retina tips for stereo sensing a high-speed flight object.

1. はじめに

ロボットの制御に関する研究は数多く報告されている。最近では、安定性解析やロバスト性などの制御自体の研究から、タスクに対する動作をいかに巧みにロボットを制御するかに関する研究の目標が移り変わってきている。本研究で必要とするロボットの高速制御に関する研究も、そのうちのひとつである。工場の生産ラインにおいても、高速かつ精密なロボットの必要性が高まってきている。そのため、多関節ロボットの運動学に関して、多くの報告がある。逆運動学を用いた制御法は、多関節になるほど解が数多く存在し、ヤコビ行列を計算するのに多くの時間を必要とする。その解決法として、ヤコビ行列の重み付き一般化行列を用いた関節変数解法では、ヌル射影オペレータ算出のため計算量をあまり必要としない方法が報告されている¹⁾が、いまだシミュレーション段階である。また、空間変分法を用いて拡散方程式と誤差修正式を併用した非線形マッピングの並列分散計算方式の提案がある²⁾。しかし、実際のロボットに適用するには、空間における格子点を増やす必要があり、格子点を増やせば計算に多くの時間を費やしてしまうと言う元の問題に戻ってしまう。また、2次元3関節のロ

ボットによるコンピュータ上のシミュレーションしか行われていない。

本研究では、ボールの捕獲と言う動作をロボットにさせるため、ボールの位置の確定が前提となっている。CCDカメラを用いたシステムは、1秒間に30コマという制限があり、ロボットの制御周期は、10ms以下であり視覚処理が制御処理に比べて遅いことが問題となっている³⁾。これを解決する方法として、視覚を含む複数の高速センサフィードバックを用いた階層並列情報処理システムが報告されている⁴⁾。しかし、このシステムは構造が非常に複雑であり一般的ではないことが問題である。また、ボールの軌道予測をする手段として、ガウシアンネットワークを用いた方法⁵⁾がある。ボールの位置をシャープに予測するのではなく、カメラセンサと連携するために、あいまいさを含んだボールの位置予測を行うことでボールの大体の位置を予測している。しかし、この方法もCCDカメラのサンプリングタイムの制限が問題であった。ロボットによるボールの捕獲作業はWonn⁶⁾によって報告されている。ボールの軌道予測をする手段として、ガウシアンネットワークを用いた方法でのカメラシステムの改良により、カメラがボールを追うことでボールの初期の位置から最後の位置まで追うことができる。また、4自由度のDDロボットを使うことで、制御を簡単にしている。

本研究では、ボールの現在位置の認識方法として、当

[†] 愛知工業大学 電気電子工学専攻 (豊田市)

^{††} 愛知工業大学 電気・材料工学専攻 (豊田市)

^{†††} 愛知工業大学 電子工学科 (豊田市)

初CCDカメラを用いた方法で行っていたが、一秒に30フレームでは、ボールの位置検出に時間がかかりすぎ、ロボットの制御時間に間に合わない問題があった。そこで、本研究では、人工網膜チップを用いることにした。人工網膜チップについては、八木ら⁷⁾が報告している。網膜の超並列画像処理機能をアナログCMOS集積回路(ビジョンチップ)として実現し、信号と雑音の空間周波数帯域に応じて効率的に画像を抽出する際の前処理プロセッサとして応用できることを報告している。しかし、このチップは手に入りやすく画素数が少ないため、正確な位置の検出ができないなどの問題がある。このようなことから、本研究では、逆運動学マップ法理論を実機で実現され、その有用性、問題点について考察することである。その応用アプリケーションとして、冗長ロボットによる飛翔物体の捕獲作業を行う。位置検出システムについては、従来のCCDカメラを用いる方法は、1秒間に30コマという制限があったため、その問題を回避するための手段として、ボールの位置検出を高速にできるように、三菱電機製の人工網膜チップによる位置検出を試みた。

また、ロボットの制御においては、逆運動学問題を回避する一手段として、逆運動学マップを提案する。逆運動学マップでは、荒い格子状に分割し、その格子点を実現する関節角度をオフラインで計算しておき、オンラインでは格子点から指令位置へ手先を移動するための補正だけを行って、計算時間を短縮する。この理論を2次元7関節に拡張し、また、実際のロボットで制御することによって、逆運動学マップ法理論の有用性を確かめる。より高速でより正確な冗長ロボットの動作を実現する。

2. 位置検出システム

ロボットが人間のように飛翔物体の捕獲をする場合、人間の眼の様な働きをする位置検出装置が必要となる。物体の位置を正確に検出できなければ、物体を捕獲することはできない。また、移動物体よりも検出スピードが低いと、正確に位置を検出できずロボットは物体に追従することすらできず、振動してしまう。よって、速度の速い物体を捕獲するには高速な位置検出装置が必要になってくる。そこで、人工網膜チップを採用した。

2.1 人工網膜チップ

人工網膜チップとは、この研究で用いた三菱電機製の人工網膜は、人間の目のように画像を高速(1ms以下)に検出してチップ内部で高速に画像処理を行うLSI

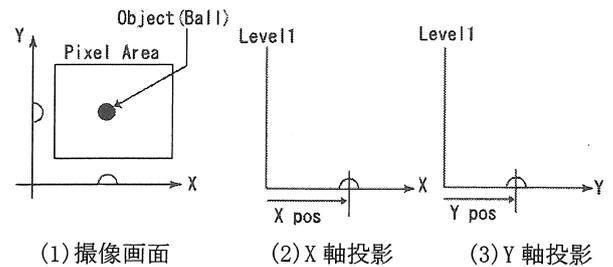


図1 2D-1D変換処理

のことである。CCDでは、画像の撮像は行うが画像処理はCCD単体では行うことができない。そのために、データの転送、その次に画像処理と段階的に処理を行わなければならないため、時間がかかってしまう。しかし、人工網膜チップでは画像撮像と同時に、画像処理を並行に行うことができる。人工網膜チップ内で行うことのできる画像処理は、輪郭強調機能、輪郭抽出画像機能、ランダムアクセス機能、行・列方向射影機能、ポジ・ネガ画像出力切り替え機能である。これらの機能は、画像を撮像すると同時に行うことができるので、読み出された画像データはすでに画像処理が実行されたデータとなって人工網膜チップから出力される。

2.2 情報圧縮機能

従来、CCDでの撮像画像はフレーム単位でデータ出力が行われている。このため、解像度が上がれば出力データ数は二乗で増えていく。しかし、人工網膜チップではその問題を解決するために、行・列射影機能を持っている。これは、撮像されたデータを行または列方向へ投影する機能である。そのため、撮像画像は2次元から1次元へ圧縮される。今回使用した人工網膜チップの画素数は128×128ピクセルである。1フレーム16384ピクセルから構成されるが、行・列射影機能を使用することによって128×2本のピクセルに圧縮することができる。

2.3 位置検出理論

位置検出システムでは、人工網膜チップの画像圧縮機能を使用する。この機能は、2.2節で述べたように1フレームを行・列方向へ投影する機能である。この機能を使用して位置を検出する方法を次に示す。まず、撮像された画像は図1(1)のようなものであったとする。これを人工網膜により、行・列方向へ圧縮されたデータを図1(2)(3)に示す。それぞれのデータには、物体が球体であるためピークがそれぞれ存在する。それらの最大値を行・列方向の中心位置とする。この二つの最大値の位置

から x , y が得られることになる. 人工網膜チップを使用した位置検出システムでは, 3次元の位置情報を得るために2つの人工網膜チップを使用する. 2つの人工網膜チップで平行ステレオビジョンを構成する. 平行ステレオビジョンとは, 2台のカメラの光軸をそろえて, 視点の高さもそろえたものをいう. 平行ステレオビジョンからの奥行き決定は容易で, 空間上の点 (x, y, z) が, 右左のカメラ上の (x_l, y_l) , (x_r, y_r) に像を結べば,

$$x = \frac{b(x_l + x_r)}{2d} \quad (2.1)$$

$$y = \frac{bY}{d}, \quad Y = y_l, y_r \quad (2.2)$$

$$z = \frac{bf}{d} \quad (2.3)$$

とあらわすことができる. ただし, f は CCD と撮像面の距離, b はカメラ間の距離, そして d は視差といふ $d = x_l - x_r$ であらわされる. 検出する際, 1ピクセルずれると z 方向に 3cm のずれが出る. また, x と y 方向は近ければ近いほど精度が上がる.

2.4 ボールの軌道計算法

センサによって得られた位置情報は, ボールを検出できる間だけであり, ボールを検出できなくなるとボールの位置を計算によって推定しなければならない. そのため, ボールが検出できなくなったあとのボールの位置を推定するために逐次最小2乗法を用いた. 通常最小2乗法は, N 個のデータからバッチ処理的に計算されるオフライン方式である. 最小2乗法では, 新しいデータが追加されると, また新たに, $N + 1$ 個のデータから全体を計算しなければならない. 観測されるデータが多くなればなるほど計算量が多くなるという欠点がある. 逐次最小2乗法は, 新しいデータが追加されるごとに, 前の推定値を更新していく方法を採用している. そのため, オンラインでの計算に適しており, 短時間で計算ができるという利点がある. しかし, 初期値が必要になるため, 初期値はあらかじめ経験的に最も誤差が少なくなるような値に設定した.

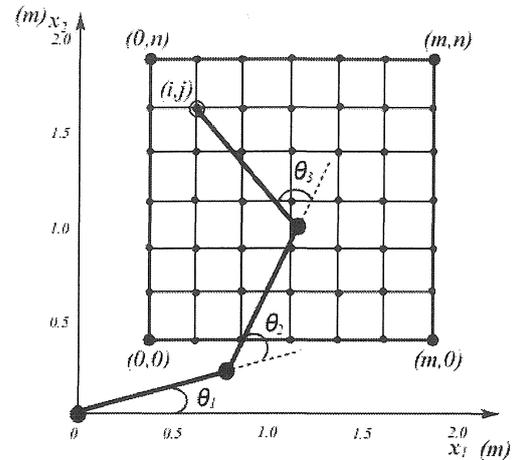


図2 関節角度のマッピング

3. 逆運動学マップ作成

図2に示される2次元平面上に3リンク (L_1, L_2, L_3) と3つの回転関節 θ をもつロボットについて考える. この2次元平面上に4つの教師情報 $(0,0)$, $(0,n)$, $(m,0)$, (m,n) で囲まれた範囲内での逆運動学マップを作成する. このマップ上の各格子点には, その点の位置にロボットの手先が到達できるようなロボットの各関節角度が収納される. 例えば, 図2の格子点 (i, j) には, 関節角度 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ が収納されることになる. マップを作成する際,

- 手先位置の連続な変化に対して関節角度の変化も連続であること
- 手先位置と目標位置である格子点との間に誤差がないこと

この2つの仕様を満足しなければならない.

マップの計算の始めとして, 4隅の格子点に教師情報であるロボットの各関節角度を与える. この教師情報から拡散によって関節角度情報(姿勢)を均等に拡散していくため, 姿勢は教師情報から決まる.

3.1 拡散

拡散方程式は, 次式で与えられる.

$$\theta_{i,j}^{t+1} = \frac{1}{4} \{ \theta_{i-1,j}^t + \theta_{i+1,j}^t + \theta_{i,j-1}^t + \theta_{i,j+1}^t \} \quad (3.1)$$

ただし, t は繰り返し回数で (i, j) は作業空間における1つの格子が占める位置を表す。
また,

$$\dot{\theta} = A\dot{x} \quad (3.2)$$

を満たす逆ヤコビ行列 A を拡散過程において書く繰り返す回数の変位差 $\Delta\tilde{\theta}^t = \theta^t - \theta^{t-1}$,

$\Delta\tilde{x}^t = x^t - x^{t-1}$ より,

$$A_{i,j}^{t+1} = A_{i,j}^t - \frac{\varepsilon}{\|\Delta\tilde{x}_{i,j}^t\|^2} \frac{\partial E_{i,j}}{\partial A_{i,j}^t}$$

$$= A_{i,j}^t + \frac{\varepsilon}{\|\Delta\tilde{x}_{i,j}^t\|^2} (\Delta\tilde{\theta}_{i,j}^t - A_{i,j}^t \Delta\tilde{x}_{i,j}^t) \Delta\tilde{x}_{i,j}^{tT} \quad (3.3)$$

を用いて求めることができる。 ε は学習係数である。この A は, 次の誤差修正で利用することができる。以上により, 拡散方程式から連続的な姿勢を得ることができる。しかし拡散は, 線形的な空間補完に過ぎず, t の極限でも手先の位置は目標位置に近づくだけで, 必ずしも目標に一致するわけではない。そのため, 次の誤差修正で誤差を収束させる。

3.2 誤差修正

誤差を小さくするための角度の修正式は次式で与えられる。

$$\theta_{i,j}^{t+1} = \theta_{i,j}^t + \beta A_{i,j}^t \{ x_{i,j}^d - f(\theta_{i,j}^t) \} \quad (3.4)$$

この式において, 拡散で計算した逆ヤコビ行列 A を用いることで, 誤差を減少することができる。ここで,

$x_{i,j}^d$ は目標位置 (格子点の位置) で, $f(\theta_{i,j}^t)$ は関節角

度から求めた手先の位置を表す。また, β は修正の重

み係数である。拡散とこの誤差修正により, 空間的に連続的であり, なおかつ誤差がないマップを作成することができる。この過程を図3に示す。

① 空間上のマップの4隅点 $(0,0)$, $(0,n)$, $(m,0)$,

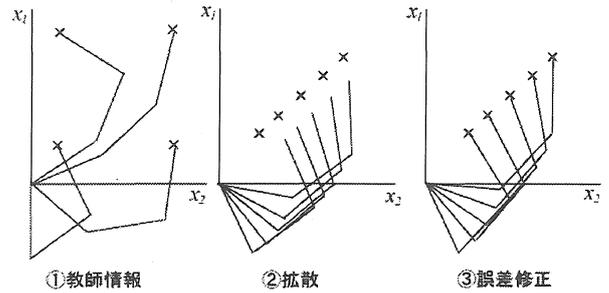


図3 マップ作成の計算過程の様子

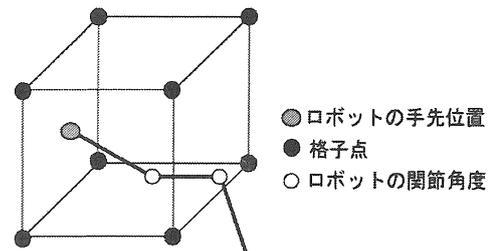


図4 一致しない場合

(m, n) に教師情報となる各関節角度 θ を与える。

② 拡散方程式に基づいて, 教師情報の θ を時間 t により拡散させる。この拡散を手先の位置 x の変化が小さくなるまで繰り返す。このとき x , θ の微小変化から逆ヤコビ行列 A を計算する。拡散方程式により, 連続的な姿勢が得られるが x と目標位置 x^d に誤差がある。

③ x と x^d に誤差をなくすために, 誤差修正式に基づいて誤差が収束するまで繰り返す。

以上の手順により, 誤差のない連続的な姿勢である逆運動学マップが得られる。

3.3 再計算

逆運動学マップを用いる際, 図4のように, 実際においては必ずしも望まれた手先の位置が格子点上にあるとは限らない。高密度のマップを作ることも一つの手だが, 計算時間とマップの情報量が膨大になり困難である。そのため, 低密度のマップから再計算を行うことを検討した。これは, 望まれた手先の位置から一番近い格子点を見つけ, その手先の位置と格子点との差を誤差と見なし, その一番近い格子点の逆ヤコビ行列を取り出し, 姿勢を変えずに, その点だけを誤差修正式において再び計

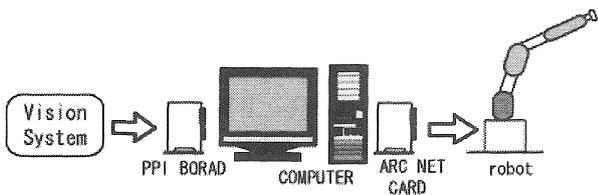


図5 全体のシステム図

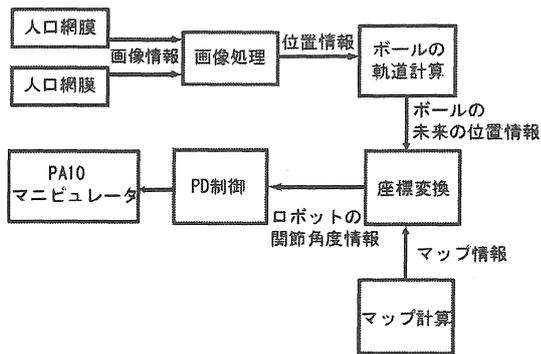


図6 実験システムのブロック図

算しなおすものである。これにより、望まれた手先位置を満足するような新たなマップを作る必要はなくなり、計算時間も短縮され、オンラインで実行することができるという利点がある。

4. 実験

実験システムは、図5のようになっている。まず、センサシステムから x, y, z の情報を PPI ボードを通して、コンピュータに送られる。そして、コンピュータ内でセンサシステムからの情報を元に軌道計算を行い、ボールの飛んでくると思われる位置の推定値を計算する。その推定値を元に逆運動学マップを用いてロボットの関節角度を計算し、アークネットカードを通して、ロボットへ送られる。また、実験システムのブロック図は図6に示す。

4.1 実験方法

各装置の配置図を図7に示す。

まず、照明条件として、ライトをボールが飛んでくる方向に向け照らした。これは、ライトの光に対して全反射する再帰性反射剤をボールに塗ってあるためである。そして、ボールに当たって反射した光をカメラが捕らえる方法を用いた。制御開始と同時にボールを投げ、センサから検出された値から、ボールの軌道を計算した。そして、その値から最も近い格子点を見つけ出す。その格子点から再計算を行い、より正確な関節角度を計算する。

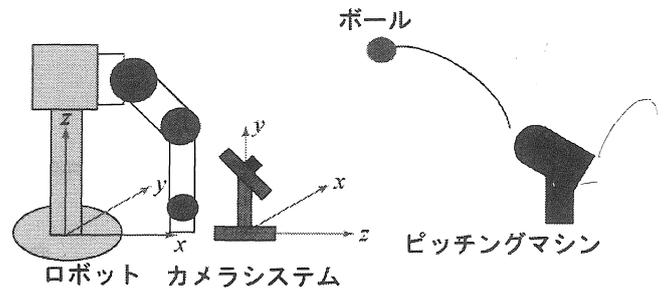


図7 各装置の配置図

ボールの速度は、おおよそ 40km/h である。また、ロボットの最高速度は、1, 2, 3 軸は 1 [rad/sec] で、4, 5, 6, 7 軸は π [rad/s] である。また、センサの検出値において、ボールに当たった光が検出できない場合は輝度の最大値が見つからなかったとして、 ∞ を出力するため、その値が入ってきたときは、軌道計算や再計算を行わず、その直前の状態の値を維持した。また、ボールがセンサを通り過ぎた場合は、検出が不可能になるため、通り過ぎる直前の値から、そのあとの軌道を計算した。これにより、得られた情報を最大限に生かすことができる。次に、実験結果を述べる。

4.2 実験結果

最初に、センサから検出した値、それを元に軌道計算した値とロボットの手先位置の比較を行った(図8)。ロボットの手先の位置は、順運動学を使って求めた。今回、逆運動学マップは2次元状のものを使用した。センサは x 軸も検出したが、実際の制御には、ロボットから 1m 離れた位置に逆運動学マップを展開したため、定数を用いた。軌道計算の推定値にロボットの手先位置が近づいていることがわかる。このとき、センサの値と軌道計算との値に差があるのは、カメラの座標とロボットの基準座標が異なるからである。カメラ座標からベース座標にするため座標変換を行い一致させた。

つぎに、再計算から得られた関節角度と実際のロボットの各関節角度比較を行った。図9は、速度制御した場合の結果である。総合的に、再計算で得られた角度情報に従って、実際のロボットの関節角度が追従していることがわかるが、再計算によって得られた目標角度になるまでに約 600ms から 1000ms 時間がかかってしまっている。実際のロボットの関節角度が滑らかなのは、角度変化が大きいと大きな制御値を指令してしまい、慣性の影響でロボットがスムーズに動かなくなるのを避けるために、徐々に移動速度をあげるように制御を行ったからである。このことで、安定で高速な制御が実現できるが、

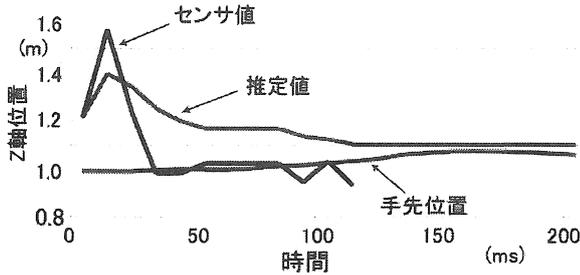


図8 位置の比較結果

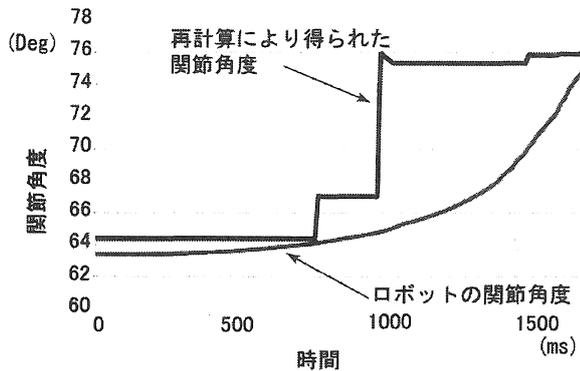


図9 速度制御で行った場合

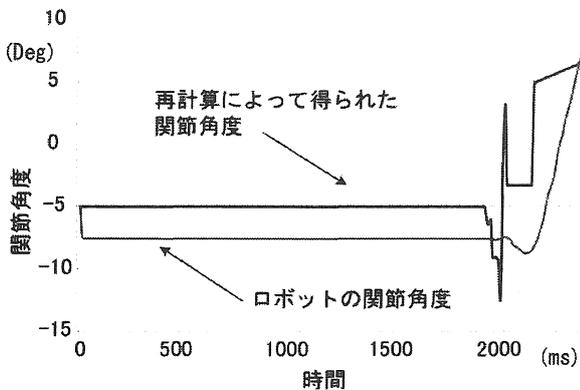


図10 トルク制御で行った場合

ボールを捕らえるために必要な速度を満足していない。

次に制御方法をPD制御に変えて実験を行った(図10)。大体の目標の角度までに350msで到達している。しかし、PとDのゲイン調整と重力項が適切でないために、正確に目標位置までに達することができなかった。この場合、ゲインを大きくしただけでは、発振の原因になってしまい、また姿勢によってもゲインを変えて制御を行わなければならない。これがゲイン決定の困難さを表している。再計算から得られた値がすべてのグラフにおいて振動してしまっているのは、ボールを検出し始めはセンサからの値が不安定で一定ではないため、それによって得られた位置情報によって再計算の値も敏感に

変動してしまうからである。しかし、PD制御を用いることで速度制御に比べ目標角度の実現がより短い時間で行うことができた。しかし、PD制御の場合、目標角度に対してすばやく動作するため、目標位置がすこしでも振動するとそれに追従しようとしてロボットも同じように振動してしまっ

5. 考察

今回の実験では、速度制御の場合とトルク制御の場合で実験を行った。ボールの速度は、ピッチングマシンを用いたが、その放り投げられるボールの速度は、およそ40km/hであった。要するに、1sに11m進むことになり、ロボットの制御周期10ms間には、11cm移動する。トルクの値は関節により違うため、ロボットの手先のほうは、すばやく動くことができるが、一番質量がある第1関節には関節が10度動くのに約350msかかった。これは、まだトルク制御においてPとDのゲイン調整が適切に設定できていなかったものと思われる。また、今回の実験で用いたロボットは慣性が非常に大きいため、動き始めに時間を要する。そのため、ボールを検出し、その位置を確定して逆運動学計算を行い、各関節角度を決定しその角度指令をロボットに送るまでの時間は短いですが、実際にロボットが動き出すまでの時間に時間を要してしまっ

6. まとめ

6.1 結論

本論文では、冗長ロボットの制御問題について逆運動学問題を取り上げ、その逆運動学問題の解決法について検討し、逆運動学マップを生成することによって、高速な制御を可能にし、実機による有用性を示した。また、逆運動学マップにより、格子点上にない位置においても、再計算を採用することにより望まれた手先位置へロボットの手先を正確に持っていき制御をすることができた。

また、従来の位置検出システムの改良として、人工網膜チップを用いることで、CCDカメラと場合と比較して、一回のセンシング時間を33msから10ms以下に短縮した。これにより、ボールのような速い動作をする対象物も正確に検出できるようになった。また、軌道計算は、

逐次最小2乗法を用いることで計算時間が短縮し、ロボットの制御周期に影響なく計算を行った。

ロボットの制御においては、高速制御させる場合、慣性の影響でロボットの動き始めが振動し、不安定になってしまう点を改良し、徐々にロボットの移動速度を上げるように制御させた。この改良により、ロボットの移動速度が速くても振動せずスムーズに制御が行えるようになった。しかし、ボールを捕らえるために必要とされる移動速度に達しないため、ボールの捕獲は困難であった。

6. 2 今後の課題

今後の課題として、今回カメラの設置場所をロボットの前に置いたが、ロボットのアームの上において実験ができるように改良と調節が必要である。

逆運動学マップについては、2次元のマップを採用したため、これを3次元に拡張することが望まれる。これは、まだシミュレーション段階であり、実機用の3次元マップ教師情報は、連続な拡散が行えるかを左右するものであるため、3次元の正確な教師情報が早急に必要である。ロボットの制御は、速度制御を用いたが、最高速度であっても、ボールを捕らえるには若干遅い場合もあり、制御方法をPID制御に変えるのも一つの手段である。しかし、この制御を用いる際に、弾性係数と粘性係数は、経験的に求めるしか手段がなく、また、今回のようなロボットを地面に対して平行に設置した場合は、ロボットを立てて用いた場合とでは、重力の影響が変わるため、重力項の計算が必要である。最後に、ボールの捕獲には網を用いたが、今注目されている把持システムに発展させることも望まれる。

参考文献

- 1) 小金澤 鋼一:冗長自由度を有するマニピュレータの逆運動学の高速かつ安定な解法, 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 5, pp721-727, 1998.
- 2) 安藤英由樹: 冗長系逆運動学マップ計算の並列分散アーキテクチャ, 愛知工業大学平成10年度 修士論文.
- 3) 宮田郁子, 安藤英由樹, 平松誠治, 羅志偉, 加藤厚生: スレーブロボットに部分的な自律性を与えたマスタースレーブシステム, 電気関係学会東海支部連合大会予稿集 1999年, p256 下.
- 4) 並木 明夫, 中坊 嘉宏, 石井 抱, 石川 正俊: 高速センサフィードバックを用いた感覚運動統合把握

システム, 東京大学院工学系研究科,

<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/~sfoc>

- 5) Hiroto Kimura, Nobuhiko Mukai and Jean-Jacques E. Slotine, "ADAPTIVE VISUAL TRACKING AND GUSSIAN NETWORK ALGORITHMS FOR ROBOTIC CATCHING", DSC-Vol. 43, Advances in Robust and Nonlinear Control Systems ASME 1992.
- 6) Won Hong, "Robotic Catching and Manipulation Using Active Vision", Massachusetts Institute of Technology, August 11, 1995.
- 7) 八木 哲也, 亀田 成司, 飯塚 邦彦: 可変受容野を備えた超並列アナログ視覚センサ, 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol. J81-D-I, No. 2, pp104-133, 1998.

(受理 平成13年3月19日)