

全身運動を伴うロボットの運動制御に関する研究

稲葉 昭夫 今井 智彦 光井 輝彰

田中 泰斗 小川 行宏 千原 健司

Motion Planning for a Humanoid Robot “NAGARA-3”

Akio INABA Tomohiko IMAI Teruaki MITSUI
Taito TANAKA Yukihiro OGAWA Kenji CHIHARA

あらまし 本研究では、多くの関節を有し、多種多様な作業を行うことが期待されているヒューマノイドロボットの動作計画法の1つについて検討した。具体的には、愛・地球博での展示を目指して県内企業と共同で開発したヒューマノイドロボット「ながら-3」に関して、デモンストレーションの中で予定しているサッカーの基本動作を対象にその動作計画法を示した。本研究で示した動作計画法は、動作を構成する一部の動作パターンを変更可能にすることにより、リアクティブに動作が修正可能である。さらに、対象物へ近づくための経路計画においては、単に距離が短い経路を探索するのではなく、ロボットの旋回動作時間等を考慮し、トータルの動作時間が最小になる経路の探索が可能である。

キーワード ヒューマノイドロボット、動作計画

1. はじめに

ヒューマノイドロボットは、多くの関節を有し、多種多様な作業を行うことが期待されている。ロボットに作業をさせるためには、これをどのように動作させるかを統合的に計画する必要がある。本研究では、このロボットの統合的な動作計画に関して検討する。

この計画には、ロボットをどのように運動させ作業対象物に作用させるかを計画する動作計画とロボットが作用する対象物に現在位置から近づくための経路計画が含まれる。これまでの研究において、さまざまな取組がなされている。動作計画に関しては、大まかに設計された動作パターンや人間の動作のキャプチャーデータを各種の拘束条件や動力学的な整合性を満足させ、ヒューマノイドロボットで実行可能なパターンに変換する「動力学フィルタ」^{[1][2]}等の有効な手法が提案されている。しかしながら、各種の動作パターンの設計指針が陽には明らかにされていなかったり、高速な計算機を必要としたり、オフライン計算を前提としたりするなど若干の制約が存在する。このため、動作パターンをリアクティブに変化させる必要がある動作計画にそのまま適用するにはこれらの制約が軽微な問題になる場合もある。また、経路計画に関しては、車輪型の移動ロボットの分野で、数多く議論され、いくつかの有効な手法が提案されている^{[3][4]}。しかしながら、これらの経路計画は、最短経路を求めるための計画法であり、移動方向の変更に必要な時間は考慮されていない。このため、移動する方向を変える旋回

動作の時間が比較的大きいヒューマノイドロボットの経路計画にそのまま適用しても、得られた解はいつも最適解となるとは限らない。

このような状況を踏まえ、本研究では、ヒューマノイドロボットの統合的な動作計画手法に関して、各作業を構成する一部の動作パターンを変更可能にすることにより、リアクティブに動作が修正可能な動作計画法と旋回動作の時間を考慮した経路計画手法について検討する。動作を実現する具体的なハードウェアとしては、ヒューマノイドロボット「ながら-3」^[5]を使用した。このロボットは、ロボット関連技術の県内企業への蓄積を図るとともに、愛・地球博での展示やデモンストレーションを目指して県内企業と共同で開発した。また、対象とする作業としては、サッカーのキック動作とトラップ動作とする。これらの動作を選ぶ理由は、デモンストレーションとして親しみやすい動作であると共に、これらの動作が、ロボットとボールの相対位置関係の変化にあわせて動作計画をリアクティブに変更する必要がある動作であるためである。

2. キックとトラップに関する動作計画

一般に、ヒューマノイドロボットの対象物に対する動作は、いくつかの基本動作から構成される。このため、本研究では、動作をいくつかの基本動作フェーズに細分化し、これらに対して、個別に運動を記述する。運動は、支持脚の足元からみた腰の運動と腰からみた遊脚の足先

の運動として多項式で記述する．この多項式に関する境界条件は，連続する動作フェーズの運動の位置，速度および加速度が連続となるように定めることとする．

本研究で対象としているキック動作やトラップ動作に関しては，静止した状態での動作や歩きながらの動作などさまざまな形態が想定される．本研究では，問題を簡単にするため，両足をそろえて静止した状態から動作をはじめ，再度同じ状態に戻ってくる動作を対象とする．

2. 1 キック動作

キック動作は，次の5つのフェーズに細分化する．

片足立ち動作

遊脚の振り上げ動作

遊脚の振り下ろし動作

遊脚の引き戻し動作

両脚支持への動作

本研究では，これらの各動作フェーズに関して，次の点に留意して運動を定義した．

○フェーズ

この運動は，支持脚の足の上に重心を移動させ，遊脚を離床させる運動であるので，次に示す3つのサブフェーズの運動として定義した．

- 1 両足支持での重心移動
- 2 重心を移動しながらの遊脚の離床動作
- 3 片足支持での静止

ここで，支持脚上への重心移動が完了する前に，遊脚の離床動作を実行する理由は，離床動作時の慣性力によりロボットの動作が振動的になるのを抑制するためである．（重心移動時の後半での重心の減速動作時の慣性力と離床動作時の慣性力とは互いにモーメントを打ち消す方向に働く．）重心移動に関しては，腰の平行移動だけで実現すると，腰の移動量が大きくなるため，腰の平行移動に加えて，上半身を傾けることにより，腰の平行移動量を抑制することとした．

○フェーズにおける重心位置

フェーズの運動は，ロボットの前後方向の動作であるため，左右方向には大きな慣性力は働かない．さらに，これらの動作の開始時や終了時には，ロボットは静止しているため，慣性力は働かない．このため，静的な安定を保つ必要があり，重心は，支持脚の足の上になければならない．そこで，フェーズの開始時とフェーズの終了時には，重心が支持脚の足裏の中央の上にあるように境界条件を設定した．さらに，これらのフェーズの運動に関して，支持脚の姿勢をフェーズ開始時の姿勢を保持することにより，重心位置が支持脚の足裏中央の近傍にあるようにした．

○フェーズにおける遊脚の動作

ボールをできる限り強くキックするため，フェーズの遊脚運動の設定条件を水平平面へ投影した両脚の足先が揃ったとき，足裏が床面に最も近づきかつ速度が最大になるよう定めた．

○自己位置とボール・ゴールの位置関係の変化に対するキック動作の修正

ロボットが歩行してボールに近づきキックする場合，足裏の滑りや床面の起伏などによる移動軌跡のずれや，何らかの外力によるボールの移動など，ロボット，ボール，目標位置（ゴール等）の相対位置関係が当初計画した関係から変化することが容易に想定される．このため，ロボットがボール近傍で，自己位置とボールやゴールの位置の関係を再計測したデータに基づいて，キック動作を修正できるようにフェーズの運動を設定した．ボールを目標方向に蹴り出すためには，フェーズの遊脚の足首の運動を床面に投影した軌跡は，ボールと目標位置を結んだ直線L上になければならない（図1）．このため，この直線Lとロボットの基準座標のy軸との交点 $P(0, y_p)$ を基準としてフェーズの運動を修正する．具体的には，フェーズの運動を床面へ投影した軌跡Kが直線Lと平行になるように，遊脚の股関節のヨー軸にオフセットの回転移動量 θ を与える．さらに，軌跡Kが交点 $P(0, y_p)$ を通過するように，股関節のロール軸にオフセットの回転移動量 ϕ を与える．これらのオフセット量は，基本動作時の移動量に対してフェーズの動作中になめらかに加え，フェーズの動作中になめらかに減ずることにより付加した．

○フェーズ

フェーズは，フェーズに準じて，次の3つのサブフェーズに細分化して運動を定義した．

- 1 重心を移動しながらの遊脚の着床動作
- 2 両足支持での重心移動
- 3 両足支持での静止

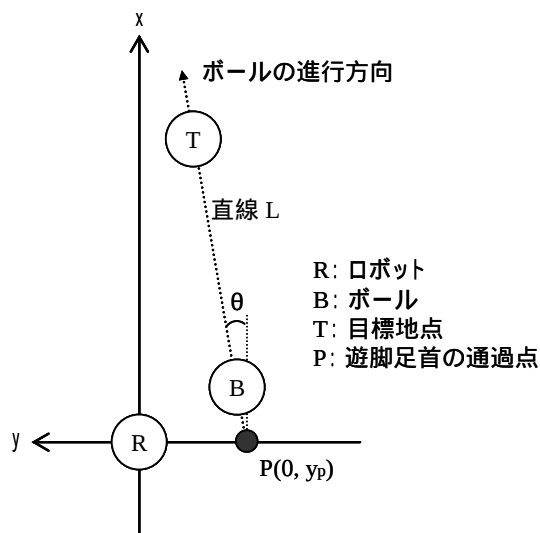


図1 キック時の姿勢調整

2. 3 トラップ動作

トラップ動作においては，正面からボールがロボットの足元に向かってくと仮定する．この動作は，片足立ちになって，遊脚の足にボールを当てて止める動作であ

る．本来のトラップ動作は，ボールに遊脚の足を当てた瞬間，ボールの進行方向に足を引いて静止させることが必要であるが，ロボットでこの動作を実現することは，ボールの位置計測時間やロボットの動作速度の問題から実現することは困難である．このため，本研究では，ボールに足を当てることのみに留めることとし，本動作を次の5つのフェーズに細分化する．

片足立ち動作
遊脚を開く動作
姿勢保持
遊脚を閉じる動作
両脚支持への動作

本研究では，これらの各動作フェーズに関して，次の点に留意して運動を定義した．ここで，フェーズ に関して，キック動作と同じであるのでこれらに関する事項は省略する．

○フェーズ における重心位置

フェーズ において，遊脚は，ロボットの側面に大きく開く．このため，重心を支持脚の足の上に保持するためには，遊脚と反対方向に上半身を移動させることが必要となる．本研究では，腰の移動量を抑制するために，支持脚股関節のロール軸にオフセットの回転移動量を加え，上半身を遊脚が開く方向とは反対方向に傾けることとした．このオフセット回転移動量はフェーズ の動作時に加え，フェーズ の動作時に減ずることとした．

○ボールの軌道変化に対する遊脚の開脚動作の修正

実際のトラップ時に，ロボットの立ち位置に対してボールが常に一定の位置に到達するとは限らず，ボールの予測軌道および，その到達時間を正確に予測することは困難である．そこで，フェーズ で保持する姿勢を，遊脚の足首が予測軌道上にあるように調整することとした．また，向かってくるボールの軌道に対して遊脚の足の側面が直角に近いほど，軌道の誤差に対して対応することが可能となるため，遊脚の保持姿勢は，足首がボディの

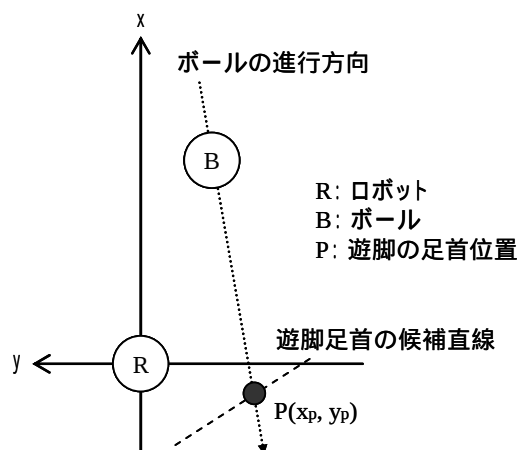
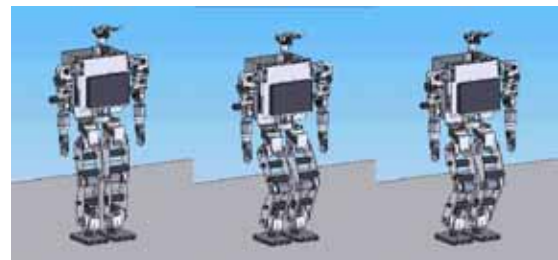


図2 トラップ時の姿勢調整

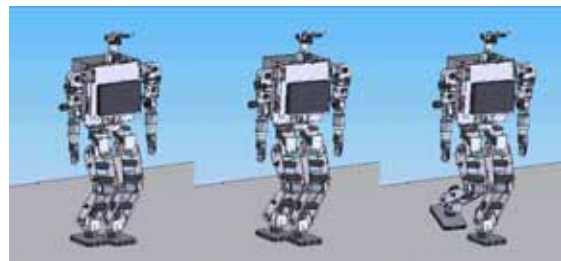
側面にくるように定めた．具体的には，問題を簡単化するために，ボディの側面付近の遊脚の足首の可動範囲内で，足首の保持姿勢の候補を直線でヒューリスティックに定め，この直線とボールの予測軌道が交わる点 $P(x_p, y_p)$ を保持姿勢の足首位置とした（図2）．

2.4 シミュレーションによる検証

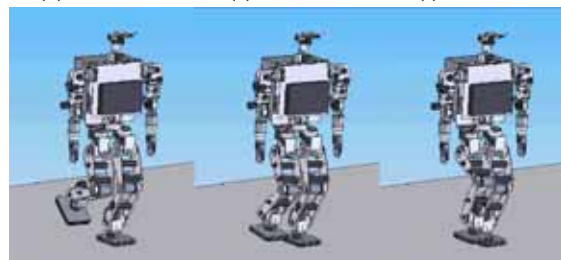
本研究で定義したキック動作とトラップ動作に関してシミュレーションによりその動作が実行できることを検



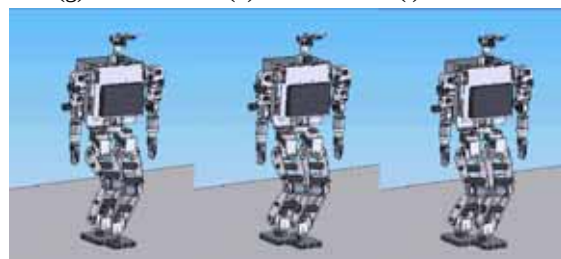
(a)初期状態 (b) $\angle I-S^*$ 初期状態 (c) $\angle I-S^* -1$



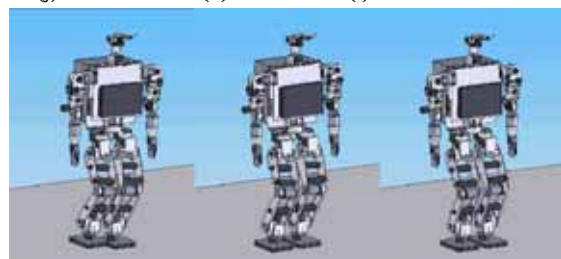
(d) $\angle I-S^* -2$ (e) $\angle I-S^* -2$ (f) $\angle I-S^*$



(g) $\angle I-S^*$ (h) $\angle I-S^*$ (i) $\angle I-S^*$

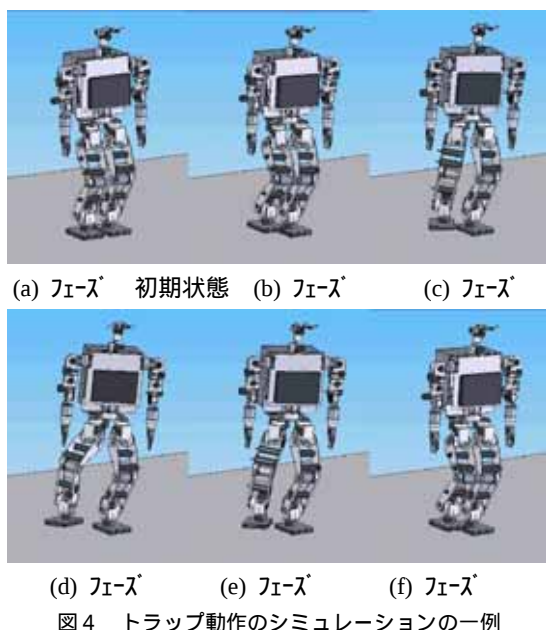


(j) $\angle I-S^*$ (k) $\angle I-S^*$ (l) $\angle I-S^*$ 初期状態



(m) $\angle I-S^* -1$ (n) $\angle I-S^* -2$ (o) $\angle I-S^* -3$

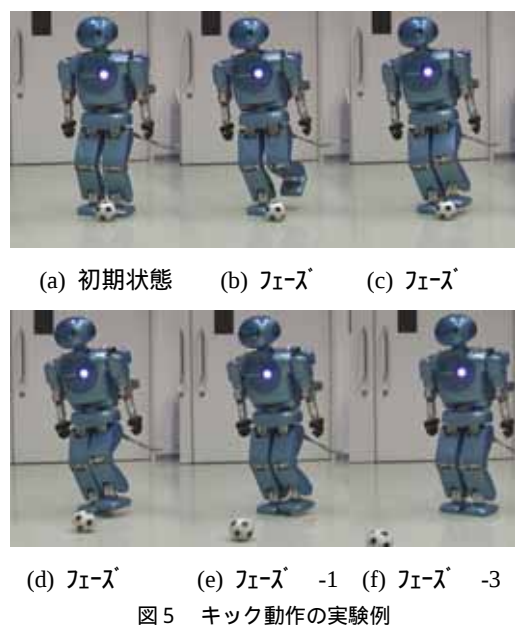
図3 キック動作のシミュレーションの一例



証した．この結果を図 3，4 に示す．キック動作およびトラップ動作に関して，ともにシミュレーション上で安定した動作が可能であることを確認した．

2.5 実験

本研究で定義したサッカー基本プレイ(キック)の動作計画をヒューマノイドロボット「ながら-3」に実装した。キック動作に関する結果を図5に示す。図5において、キック動作がスムーズに実行されていることが確認できる。トラップ動作についても実機に実装し、各フェーズの個々の動作が実行できることは確認した。しかしながら、フェーズの長い保持動作はモータドライバの許容負荷を超えることもあり、繰り返し動作させるには至らなかった。そのため、今回のトラップ動作に関する検討は、各フェーズの動作確認のレベルに留めた。



3. キックに関する移動経路計画

本章では、キック動作を一例として、ヒューマノイドロボットが、静止している目標対象物まで移動するための経路計画について検討する。対象とするキック動作は、ゴールの近くに置いてあるボールに対し、任意の位置にいるロボットが接近し、シュートを行う動作とする。ここで、ボールは、ロボットがキックすることにより、直接ゴールに入れることが可能な範囲にあるものとし、ロボットはゴールの中央に向かってボールをシュートすることとする。

実際のロボットの移動は、床面との滑り等により移動誤差があり、当初から詳細な経路計画を立てても実際にそのとおり実現することは困難である。このため、本研究では、ロボットの現在位置からボールの近傍まで移動する大域的な経路計画とボール近傍で微調整を行う局所的な計画に分けて検討する。

3.1 大域的な経路計画

大域的な経路計画において、ロボットがボールをゴールにシュートするために到達すべき蹴り足の目標位置は、ゴールの中央とボールを結ぶ直線上のゴールと反対側のボールの近傍であり、それを実現するロボットの目標位置は、足とロボット中心の距離だけ直線に対して垂直方向に移動した点である(図6)。本研究では、ボールに対して設定する蹴り足の目標位置の距離を、ボールとロボットが近傍で干渉しない距離として適当に定めることとする。

目標位置への到達経路に関しては、これまでに移動ロボットのモーションプランニングの中でいくつかの有効な手法が提案されている。本研究では、これらの中で、取り扱いが容易なコンフィギュレーション空間 (Configuration space) の中で、障害物 (C-Obstacle) の頂点および現在位置、目標位置をノードとし、ノード間を障害物と交差しないアークで結んだビジビリティグラフ (Visibility graph) のグラフ探索を用いた手法を基本として最適な経路を求める^{[3][4]} (図 7)。但し、コンフィギ

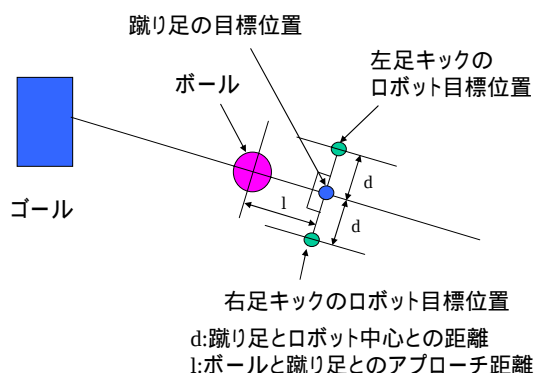


図6 大域的経路計画の到達目標位置

ュレーション空間の中で、現在位置と目標位置とを結び障害物と干渉しない直線経路が存在するときは、それを解とし、ビジビリティグラフによるグラフ探索は行わないものとする。

移動ロボットにおける経路探索は、移動方向の変更のコスト（時間）は無視され、移動距離のみをコストとして最適経路を探索する枠組みが与えられている。しかし、ヒューマノイドロボットは、方向の変更にかかる時間も無視できないため、移動距離のみをコストとして探索して得られた解は、最適解となるとは限らない。そこで、本研究では、アークのコストを、直進経路の移動にかかる時間とその経路を移動するための方向変更にかかる時間の和として定義する。これにより、方向変更のコストを探索空間の中に盛り込む。但し、ゴールのノードに結合しているアークに関しては、ゴール地点に達したときに必要な方向変更に必要な時間もコストに加えることとする。また、ノードに対してアークが、3本以上結合している場合は、その組み合わせ分だけアークとノードを新たに定義し、ノードに対するアークが2本のみになるようにグラフを拡張し、それぞれの組み合わせに応じたコストを各アークに割り付けることとする（図8）。さらに、多くのアークが結合しているノードに関しては、その組み合わせの中から、方向変更にかかるコストの大きい組み合わせを除外することにより、探索空間の爆発を抑制することとする。

このビジビリティグラフで求まるのは、移動経路のみであり、ヒューマノイドロボットに関しては、この移動経路を移動するための具体的な歩行を割り付ける必要がある。本研究では、この割付を、直進歩行と旋回に関し

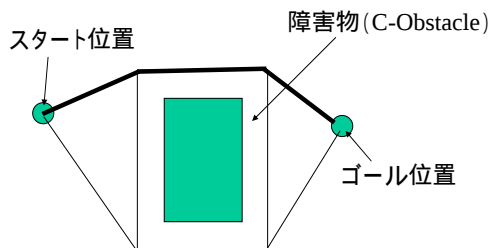


図7 ビジビリティグラフと経路計画

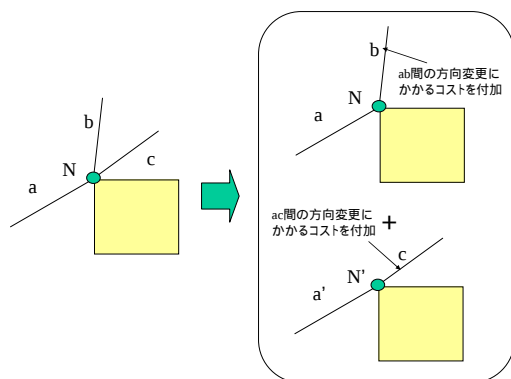


図8 方向変更にかかるコストの付加

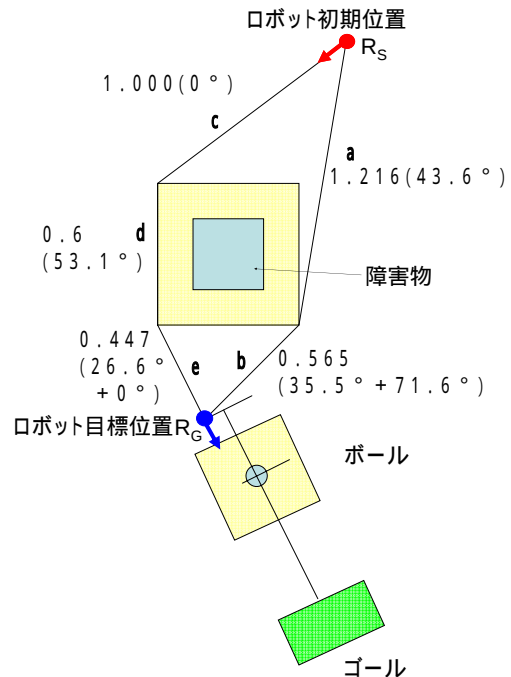


図9 大域的な動作計画の例

て、安定した動作が可能なパラメータの領域中でできるだけ大きな歩幅や旋回量が確保でき、かつ、割り当てる直進区間や旋回移動において、歩幅や旋回量が各ステップで均等になるように割り当てることとした。さらに、長距離区間の歩行により移動誤差が蓄積することを避けるため、一定歩数歩行後停止し、画像により自己位置の確認^[6]を行うこととする。このとき、誤差が大きければ、再度、大域的な経路の再計画を行うこととする。

3.2 大域的な経路計画の例

本節では、本研究で提案した手法による大域的な経路計画の例を示す。この例は、ボールの前にある障害物を避けてボールに近づき、左足でボールを蹴ってシュートするというものがある。ここで、ロボットの歩幅を、最大0.15mとし、一步の時間を1秒とする。また、一回の旋回動作の最大旋回量を 10° とし、その旋回時間を2秒（旋回動作には2歩必要となるため）とする。

前節で述べた方法に従って、ロボットの目標位置を定めると図9の中の R_g となる。コンフィギュレーション空間で、ロボットの初期位置 R_s から R_g への直線的な経路を求めると、障害物と干渉し、直線的な経路では、移動できないことがわかる。このため、ビジビリティグラフを作成する。図9において、各アークの数字は、距離と前の経路からのアークの経路を進むために必要な旋回移動量を示している。各アークに関して、そのコストを計算すると、次のようになる。

アーク a : 20秒

$$\left[\begin{array}{l} 1.216 / 0.15 = 8.1 - > 10 \text{秒} \\ 43.6 / 10 = 4.36 - > 10 \text{秒} \end{array} \right]$$

アーク b : 29秒

アーク c : 8秒

アーク d : 17秒

アーク e : 17秒

ここで、直進歩行の時間の計算で、端数を切り上げた秒数に1秒を加えている理由は、歩行開始時と終了時の歩幅が設定の半分になるため、一步分の所要時間を付加している。アーク b とアーク e に関しては、目標地点に到達した後の目標姿勢への旋回移動のコストを含んでいる。このコストに基づいて、最適経路を探索すると、経路 c d e のコスト(42秒)が最小となり、これが最適経路として選択される。この経路は、距離が最短な経路にはなっておらず、本研究で示した旋回動作時間を考慮した経路探索により、トータルの動作時間が最小となる経路が探索されたことがわかる。

最終的な歩行計画は、歩幅0.143mの直進歩行を7歩(歩行開始と終了を合わせて一步とカウント、以下同様)、左方向への8.85°の旋回を6回、歩幅0.15mの直進歩行を4歩、左方向への8.87°の旋回を3回、歩幅0.149mの直進方向を3歩となる。但し、実際の移動に関しては、ロボットの移動量に誤差が生じるため、各ノードの地点で、自己位置の推定を行い、誤差が大きければ、再度、その地点からの経路計画をすることが必要となる。

3.3 局所的な経路計画

局所的な経路計画は、大域的な経路計画による移動が終了し、ロボットの動作位置は、大域的な経路計画で定めた位置から大きくずれておらず、かつ、ロボットは、ゴールの方向を向いていることを前提とし、微調整を行うための計画である。具体的には、ロボットの足先とボールとの距離と方向を画像により測定し、その結果に基づいて、ロボットを斜め方向(前進、横移動を含む)に移動させ、キックを行うための目標位置にロボットを移動させる。

4. まとめ

本研究では、多くの関節を有し、多種多様な作業を行うことが期待されているヒューマノイドロボットの動作計画法の1つについて検討した。具体的には、愛・地球

博での展示を目指して県内企業と共同で開発したヒューマノイドロボット「ながら-3」に関して、デモンストレーションの中で予定しているサッカーの基本動作を対象にその動作計画法を示した。本研究で示した動作計画法は、動作を構成する一部の動作パターンを変更可能にすることにより、リアクティブに動作が修正可能である。さらに、対象物へ近づくための経路計画においては、単に距離が短い経路を探索するのではなく、ロボットの旋回動作時間等を考慮し、トータルの動作時間が最小になる経路の探索が可能である。

謝 辞

本研究は、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の「次世代ロボット実用化プロジェクト(プロトタイプ開発支援事業)」の採択を受け、(社)岐阜県工業会2足歩行ロボット試作特別研究会と共同で実施した。

文 献

- [1] 長阪 憲一郎, 稲葉 雅幸, 井上 博允, “動力的動作変換フィルタ群を用いた人間型ロボットの全身行動設計”, 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1207-1208, 1999.
- [2] K. Yamane and Y. Nakamura: “Dynamics Filter – Concept and Implementation of On-Line Motion Generator for Human Figures,” Proc. of ICRA2000, pp.699–695, 2000.
- [3] J. C. Latombe. Robot Motion Planning. Kluwer, 1991.
- [4] “新版 ロボット工学ハンドブック 日本ロボット学会編”, コロナ社, 2005.
- [5] 稲葉昭夫, 光井輝彰, 久富茂樹, 小川行宏, 今井智彦, 千原健司, “ヒューマノイドロボット「ながら-3」の開発”, 第6回システムインテグレーション部門学術講演会(SI2005), pp.409-410, 2005.
- [6] 小川行宏, 山本和彦, 稲葉昭夫, “ヒューマノイドロボットの位置検出手法の提案”, 岐阜県生産情報技術研究所報告No7, pp.30-35, 2006