

NAVIGASI ROBOT MOBIL DALAM LINGKUNGAN DINAMIK DAN TAK TERSTRUKTUR

Sardjono Trihatmo

P3TIE-BPPT Gedung II lantai 21, MH Thamrin 8

Sardjono@inn.bppt.go.id

Abstract

This paper presents mobile robot navigation in an environment that is unstructured, dynamic and not predefined. This navigation is based on continually sensing the local environment. Robot and personnel safety is a dominant and essential requirement for this navigation. Therefore a method for obtaining safe directions in a tessellated map of the environment is introduced. Linear combination of vectors is used to obtain the path that is a compromise between the safest and the shortest path. The path enables a mobile robot to reach its goal directly and safely.

Kata Kunci : Navigasi, robot mobil, *pathplanning*.

1. PENDAHULUAN

Keberhasilan navigasi dari sebuah robot mobil ditentukan oleh metoda perencanaan trajektori (*pathplanning*) yang dapat menghantarkan robot mobil ke sebuah tujuan tanpa mengalami tumbukan dengan lingkungan di sekitarnya. Dua buah metoda dasar perencanaan trajektori yang banyak direferensikan adalah metoda $A^{*(1),(2)}$ dan *distance transform*^{(3),(4)} dimana kedua metoda tersebut menghasilkan jarak tempuh tersingkat.

Meskipun kedua metoda tersebut secara teoritis menghasilkan trajektori yang tidak menyebabkan tumbukan antara robot dengan lingkungannya, namun terdapat kecenderungan bahwa robot akan melintas amat dekat dengan benda-benda disekitarnya. Konsekuensinya, risiko terjadinya tumbukan akan tinggi mengingat tidak ada kendali robot yang sempurna dan data lingkungan yang diterima sensor tidak cukup akurat.

Zelinsky menyarankan penggunaan metoda *path transform*⁽⁵⁾ yang merupakan modifikasi metoda DT. Metoda yang ditemukannya menghasilkan trajektori yang relatif aman dari tumbukan, akan tetapi mensyaratkan bahwa lingkungan harus diketahui sebelumnya.

Metoda-metoda berbasis teknik randomisasi seperti *randomized potential field*^{(6),(7)} *randomized roadmap*⁽⁸⁾ dan *random tree*⁽⁹⁾ merupakan metoda perencanaan trajektori yang memungkinkan robot tidak menyentuh halangan disekitarnya. Akan tetapi metoda-metoda ini hanya diuji untuk navigasi robot di lingkungan yang sudah dipetakan sebelumnya. Metoda-

metoda ini juga tidak mengkaji keamanan dari trajektori yang dihasilkan secara eksplisit.

Dalam lingkungan yang tidak dipetakan, tidak terstruktur dan dinamik, perencanaan trajektori hanya dapat dilakukan setiap kali robot menerima data-data lingkungan yang baru. Jika perencanaan trajektori menggunakan data-data lingkungan yang sudah usang, tumbukan mudah terjadi. Data lingkungan global yang pada akhirnya tidak terpakai akan membebani proses komputasi dan memori. Untuk melakukan antisipasi terhadap hal tersebut, diperlukan suatu perencanaan trajektori lokal yang berbasis data lingkungan lokal.

Perencanaan trajektori lokal menghasilkan tujuan/target lokal. Pada saat robot mencapai target lokal maka informasi lingkungan diperbarui. Berdasarkan informasi lingkungan yang terbaru, direncanakan target lokal yang baru. Demikian selanjutnya sehingga tujuan akhir robot dicapai dengan mengunjungi setiap target lokal.

Terdapat dua kriteria untuk target lokal. Pertama, target lokal ini harus aman dari tumbukan. Kedua, karena tujuan akhir robot adalah akumulasi dari setiap target lokal, maka kriteria kedua adalah bahwa setiap target lokal sedapat mungkin menghasilkan arah yang konsisten dengan arah tujuan akhir.

Lipton mengembangkan suatu metoda perencanaan lokal⁽¹⁰⁾. Model dari lingkungannya menggunakan poligon. Target lokal yang dihasilkan merupakan kombinasi dari fungsi *desirability* dan *danger*. Namun metoda ini masih mensyaratkan pendeteksian struktur lingkungan yang disebut *culdesac*. Dalam ilmu robotika

culdesac dipersepsikan sebagai sebuah susunan halangan yang berbentuk huruf U dimana robot dapat terperangkap di dalamnya.

Metoda perencanaan trajektori dalam makalah ini dikembangkan untuk lingkungan yang dinamik, tak terstruktur dan tak dipetakan sebelumnya. Metoda ini melakukan prediksi arah robot yang terlintas menuju tujuan akhir dan menentukan arah yang paling aman dalam sebuah lingkungan lokal. Dengan menggunakan sebuah parameter yang disebut faktor keamanan, kombinasi dari dua arah ini menghasilkan trajektori yang merupakan kompromi antara trajektori terlintas dan teraman. Tanpa memerlukan proses pendeteksian *culdesac* dimuka, robot tetap dapat keluar dari jebakan ini.

Pengembangan metoda ini didasarkan oleh keperluan untuk menghasilkan solusi yang handal untuk aplikasi nyata seperti kursi roda otomatis, dengan menggunakan konsep matematika dan komputasi yang sederhana. Parameter faktor keamanan diharapkan dapat meminimalkan pengaruh ketidaktepatan data yang diterima oleh sensor dan ketidaktepatan kendali robot.

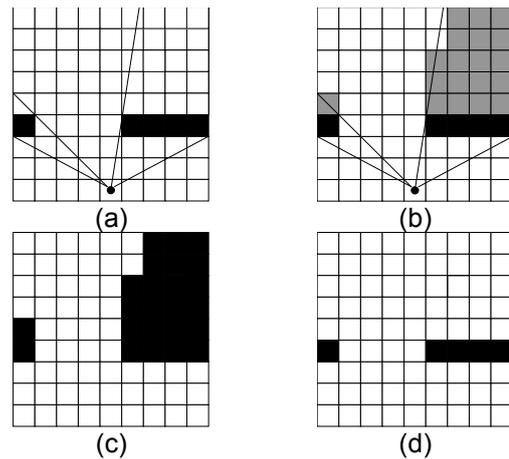
2. BAHAN DAN METODE

Model Lingkungan dan Sensor

Penentuan parameter keamanan mensyaratkan model lingkungan yang digunakan adalah model grid (sel). Meski metode perencanaan trajektori berlaku untuk tiga dimensi, namun untuk memperlihatkan hasil visual yang dicapai, maka dalam penelitian ini model lingkungan disederhanakan menjadi dua dimensi tanpa mengurangi konsep umum.

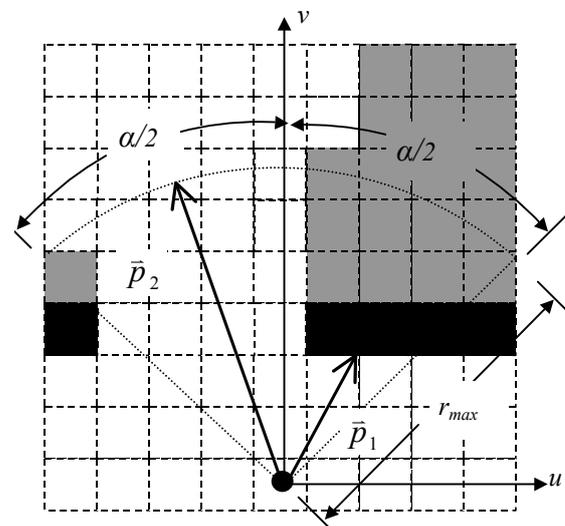
Perencanaan trajektori dengan model sel telah dipresentasikan oleh Murray dan Jennings dalam makalahnya⁽¹¹⁾. Sebuah sel diberi kategori kosong atau terisi. Sel kosong merepresentasikan ruang yang bebas halangan sedang sel terisi melambangkan ruang yang berisi obyek/halangan pada lingkungan.

Gambar 1 menunjukkan pemodelan lingkungan dari hasil pemindaian sensor. Tipe sensor yang digunakan adalah sensor yang memiliki jangkauan pemindaian yang terbatas. Dengan demikian ruangan dibelakang sebuah halangan yang tidak terpindai dianggap terisi (Gambar 1.c). Pemodelan ini digunakan untuk menentukan arah teraman pada lingkungan lokal. Akan tetapi dalam penentuan arah terlintas, prinsip optimis harus diterapkan yaitu ruangan dibelakang halangan sementara dianggap kosong (Gambar 1d).



Gambar 1. Model lingkungan

Vektor sebagai Model Arah Pergerakan



Gambar 2. Vector-vektor yang merepresentasikan arah

Perencanaan trajektori lokal menentukan target-target lokal yang dapat mengantarkan robot mencapai tujuan akhir. Penentuan arah target lokal didasarkan pada dua kriteria yaitu aman dan pintas dalam arti selalu konsisten terhadap arah tujuan akhir.

Untuk merepresentasikan arah pergerakan dibentuk sekumpulan vektor dalam sebuah segmen lingkaran seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Besar sudut segmen tersebut (α) identik dengan sudut jangkauan sensor (*forward view angle*). Panjang dari sebuah vektor ($|p|$) adalah jarak dari posisi robot radial ke sebuah posisi dimana robot akan menyentuh halangan atau suatu jarak maksimum (r_{max}) dimana pada jarak tersebut kehandalan data lingkungan yang diterima dari sensor masih tinggi. Dari sekumpulan vektor tersebut didefinisikan dua

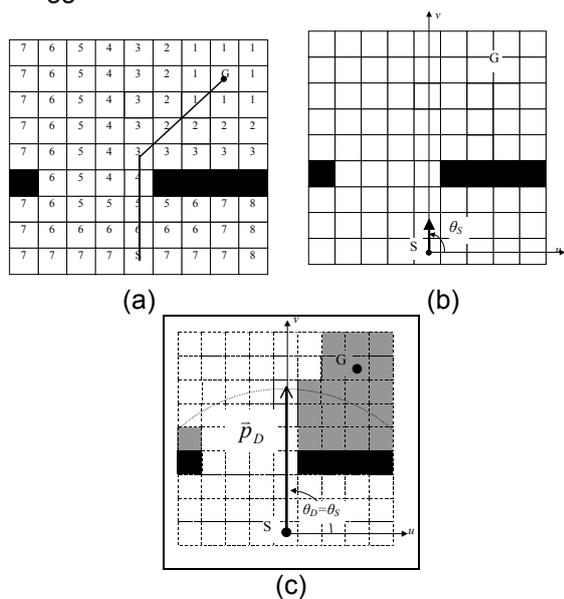
buah vektor yaitu vektor arah aman dan vektor arah pintas yang masing-masing melambangkan arah teraman dan prediksi arah terpintas untuk robot dapat mencapai target lokal.

Vector Arah Pintas

Vektor arah pintas ditentukan dengan memanfaatkan metode *distance transform*. Alasan digunakannya metode tersebut adalah metoda tersebut didisain khusus untuk menghasilkan jarak terpintas pada lingkungan yang menggunakan model sel yang merupakan model lingkungan dalam eksperimen ini.

Menurut metoda *distance transform*, setiap sel kosong memiliki sebuah nilai yang merepresentasikan jarak sel tersebut dari sel tujuan. Sel tujuan memiliki nilai nol yang berarti berjarak nol terhadap dirinya sendiri. Konfigurasi nilai sel-sel yang dibahas oleh Jarvis dalam makalahnya⁽³⁾ diperlihatkan pada Gambar 3a. Kemudian jarak terpintas dari sel awal ke sel tujuan ditempuh dengan melakukan penelusuran sel-sel tetangga yang memiliki nilai minimum hingga dicapainya sel tujuan yang bernilai nol.

Apabila arah θ_S dari trajektori pada posisi awal telah dihasilkan (Gambar 3b), maka vektor arah pintas \vec{p}_D adalah vektor yang memiliki arah sama dengan arah trajektori pada sel awal $\angle \vec{p}_D = \theta_D = \theta_S$ (Gambar 3c) dengan panjang sesuai dengan ketentuan yang digambarkan pada Gambar 2. Komputasi dapat dipersingkat apabila penelusuran cukup dilakukan hanya pada sel-sel tetangga dari sel awal.

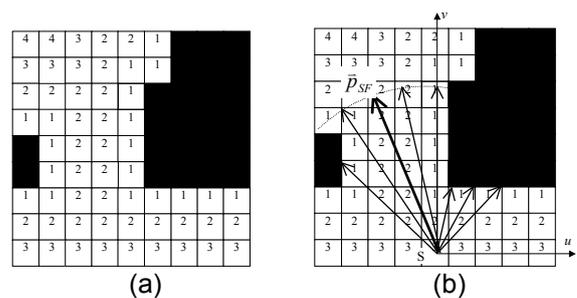


Gambar 3. Distance Transform dan Vektor Arah Pintas. G = sel tujuan, S = sel awal

Vector Arah Aman

Sebuah vektor pada Gambar 2 menentukan sejauh mana robot dapat bergerak sebelum menyentuh halangan. Namun vektor tersebut tidak menyatakan seberapa aman posisi-posisi yang akan dilalui robot sepanjang arah vektor tersebut. Kriteria sebuah posisi aman dalam lingkungan dapat ditentukan dari jarak minimum dari posisi tersebut ke tepian sebuah hambatan terdekat.

Sebuah metode untuk menentukan jarak minimum dari sebuah posisi terhadap tepian hambatan terdekat diperkenalkan oleh Zelinsky yang disebutnya dengan *path transform*⁽⁵⁾. Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa sel yang merepresentasikan hambatan (hitam) diberi nilai nol yang berarti berjarak nol dengan dirinya sendiri, sedangkan untuk sel-sel kosong diberi nilai bilangan asli sesuai dengan kedudukan sel tersebut terhadap tepian hambatan terdekat.



Gambar 4. Penentuan posisi aman:

- (a) metode obstacle transform.
- (b) vector arah teraman \vec{p}_{SF} (panah tebal).

Semakin besar nilai sebuah sel berarti semakin jauh kedudukan sel tersebut dari hambatan terdekat. Dengan demikian apabila sebuah robot berada pada posisi sel dengan nilai besar maka robot tersebut dikatakan berada lebih aman daripada berada pada posisi sel dengan nilai kecil.

Sebuah arah dikatakan aman apabila di sepanjang arah tersebut dijumpai sel-sel yang mempunyai nilai yang besar. Jika nilai sel-sel sepanjang arah tersebut diakumulasikan maka nilai totalnya merepresentasikan pernyataan berikut:

Sebuah arah dikatakan lebih aman daripada arah lainnya apabila nilai total sel-sel sepanjang arah tersebut -sampai pada suatu limit jarak- lebih besar daripada nilai total sel-sel sepanjang arah lainnya. Limit jarak dapat diartikan dengan

jangkauan maximum sensor, dimana dalam jangkauan tersebut data-data lingkungan masih handal.

Berikut dipaparkan metode untuk menentukan vektor arah aman. Sebagaimana tertera pada Gambar 4, sekumpulan vektor dedefinisikan sebagai berikut:

$$\mathbf{P} = \{\bar{p}_1, \bar{p}_2, \dots, \bar{p}_n\} \quad n \in \mathbb{N} \quad (1)$$

Pada setiap arah yang ditunjukkan oleh vektor, dibuat langkah-langkah yang berjarak sama (*aquidistance steps*). Setiap langkah akan bertemu/mengunjungi sebuah sel. Kumpulan sel-sel yang dikunjungi tersebut didefinisikan sebagai berikut:

$$\mathbf{C} = \{c_{\bar{p}_k, i}, \dots, c_{\bar{p}_k, i_{\max}}\} \quad i_{\max} = \frac{|\bar{p}_k|}{l} \quad (2)$$

dimana $c_{\bar{p}_k, i}$ adalah sel yang dikunjungi pada langkah ke i pada arah vektor \bar{p}_k dan l adalah panjang dari sebuah langkah. Panjang maksimum dari sebuah langkah adalah jarak minimum dari titik pusat area dari sebuah sel ke titik pusat area sel-sel tetangga. Ketentuan tersebut menjamin bahwa setiap langkah dari sebuah sel akan melalui sel itu sendiri atau salah satu dari sel-sel tetangga.

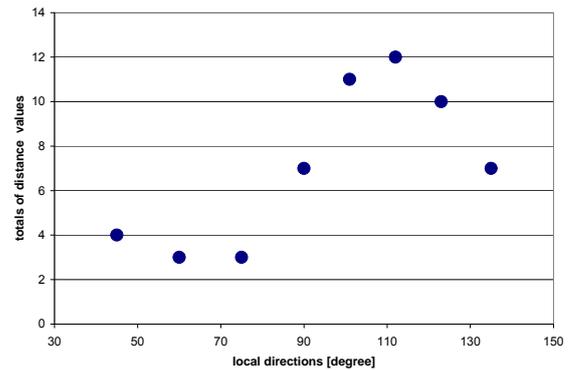
Jika $n(c_{\bar{p}_k, i})$ adalah nilai sel $c_{\bar{p}_k, i}$, maka nilai total se-sel sepanjang lintasan arah \bar{p}_k adalah:

$$N(\bar{p}_k) = \sum_{i=1}^{i_{\max}} n(c_{\bar{p}_k, i}). \quad (3)$$

Arah teraman adalah arah yang memiliki nilai total sel yang terbesar. Arah ini direpresentasikan oleh sebuah vektor yang selanjutnya disebut sebagai vektor arah aman \bar{p}_{SF} yang didefinisikan sebagai berikut:

$$\bar{p}_{SF} : N(\bar{p}_{SF}) = \max\{N(\bar{p}_k)\}, \bar{p}_k \in \mathbf{P} \quad (4)$$

Gambar 5 menunjukkan total nilai-nilai sel dari masing-masing arah yang mengacu pada Gambar 4b.



Gambar 5. Nilai-nilai total jarak .Arah teraman adalah pada arah 112 derajat

Target Lokal

Arah menuju target lokal ditentukan oleh sebuah vektor yang merupakan kombinasi linier dari vektor arah pintas \bar{p}_D dan vektor arah aman \bar{p}_{SF} . Vektor satuan dari vektor-vektor tersebut \bar{u}_{SF} and \bar{u}_D didefinisikan¹²:

$$\bar{u}_{SF} = \frac{1}{|\bar{p}_{SF}|} \bar{p}_{SF} \quad \text{dan} \quad \bar{u}_D = \frac{1}{|\bar{p}_D|} \bar{p}_D \quad (5)$$

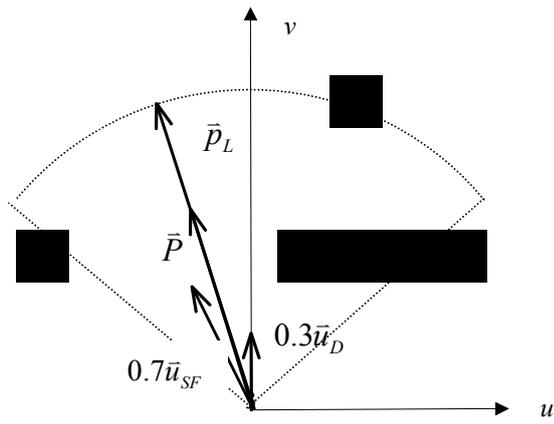
Sebuah skalar α didefinisikan sebagai faktor keamanan. Jika vektor \bar{P} adalah kombinasi linier antara \bar{u}_{SF} dan \bar{u}_D ,

$$\bar{P} = \alpha \bar{u}_{SF} + (1 - \alpha) \bar{u}_D \quad (6)$$

$$\alpha \in \mathbb{R}, \alpha \in [0 \dots 1],$$

maka arah menuju target lokal θ_{target} adalah arah dari vektor \bar{P} .

$$\theta_{target} = \angle \bar{P}. \quad (7)$$



Gambar 6. Arah menuju target lokal \bar{p}_L . Faktor keamanan α bernilai 0.7

Jika ada sebuah vektor \bar{p}_L memiliki arah yang sama dengan arah vektor \bar{P}

$$\angle \bar{p}_L = \angle \bar{P}, \quad (8)$$

maka jarak menuju target lokal d_{target} harus memenuhi persyaratan berikut:

$$d_{target} < |\bar{p}_L| \quad (9)$$

Faktor keamanan α menentukan besar prioritas dari keamanan sebuah trajektori. Nilai α kecil berarti trajektori menuju arah terlintas. Semakin besar nilai α trajektori yang terbentuk semakin aman untuk sebuah robot mobil. Gambar 6 menunjukkan arah target lokal yang ditentukan melalui kombinasi linier dua buah vektor tersebut.

Mengatasi Masalah *Culdesac*

Dalam menentukan vektor arah pintas, terdapat situasi dimana vektor arah pintas berada diluar segmen lingkaran (lihat Gambar 2) yang merepresentasikan jangkauan sensor. Situasi seperti ini direpresentasikan secara matematis jika:

$$\theta_s < (\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2}) \text{ dan } \theta_s > (\frac{\pi}{2} + \frac{\alpha}{2}) \quad (10)$$

dimana θ_s adalah arah dari prediksi trajektori global pada posisi awal

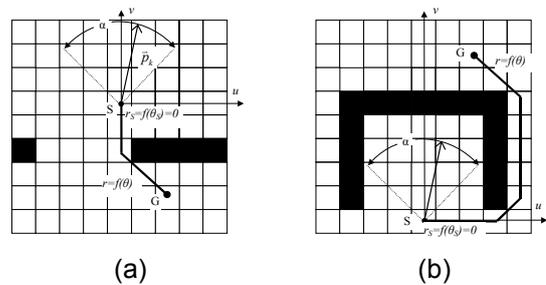
$$r_s = f(\theta_s) = 0. \quad (11)$$

Situasi tersebut menunjuk kepada dua kemungkinan. Pertama, robot akan bergerak ke arah yang belum tentu konsisten dengan prediksi

arah global. Kedua, robot akan memasuki sebuah *culdesac* (Gambar 7). Dalam situasi ini, robot harus berputar ke arah θ_s namun tidak bergerak maju karena lingkungan belum dieksplorasi. Secara matematis berarti:

$$\theta_{target} = \theta_s \quad (12)$$

$$d_{target} = 0. \quad (13)$$



Gambar 7

- (a) Robot akan bergerak ke arah yang "tidak diinginkan".
- (b) Robot akan memasuki sebuah *cul de sac*.

Nilai Batas Arah Terpintas

Ide kombinasi linier antara vektor pintas dan aman dilatarbelakangi oleh terdapatnya tendensi bahwa arah terpintas dapat menyebabkan robot melintas terlalu dekat dengan hambatan sehingga rawan terhadap tumbukan. Namun bukan berarti bahwa arah terpintas pasti selalu menyebabkan kerawanan terhadap tumbukan. Terdapat kemungkinan bahwa total nilai sel-sel yang dikunjungi pada arah vektor aman tidak berbeda signifikan dengan total nilai pada arah vektor pintas. Atas dasar tersebut dan dengan maksud mempertahankan konsistensi terhadap arah terpintas tanpa mengurangi faktor keamanan, maka didefinisikan sebuah nilai batas keamanan δ ,

$$0 < \delta < 1, \delta \in \mathfrak{R}. \quad (14)$$

Jika perbandingan antara total nilai sel pada arah terpintas $N(\bar{p}_D)$ dengan total nilai pada arah teraman $N(\bar{p}_{SF})$ diatas nilai batas δ ,

$$\frac{N(\bar{p}_D)}{N(\bar{p}_{SF})} > \delta \quad (15)$$

maka berarti arah terpintas cukup aman untuk dilintasi robot. Secara matematis berarti faktor keamanan α bernilai nol.

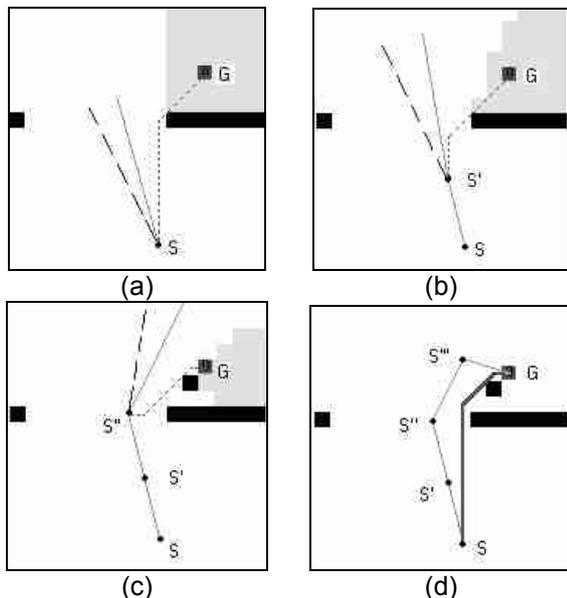
$$\theta_{target} = \angle \bar{p}_D \quad (16)$$

$$d_{target} < |\bar{p}_D| \quad (17)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini membahas hasil-hasil simulasi komputer dari metode perencanaan trajektori lokal. Robot direpresentasikan oleh sebuah titik dengan mengacu pada konsep *growing obstacles* yang diperkenalkan oleh Jarvis dalam makalahnya⁽²⁾. Faktor bobot α diberi nilai 0.6 selama tidak disebutkan secara eksplisit.

Dalam Gambar 8 sebuah robot pada posisi awal S hendak bergerak menuju posisi akhir G dalam sebuah lingkungan yang tidak dikenal sebelumnya. Pada saat pemindaian pertama (posisi S) terhadap lingkungan, sebuah obyek dekat tujuan akhir tidak terdeteksi karena tertutup oleh obyek lain didepannya. Setelah lingkungan terpindai maka ditentukanlah arah teraman (garis putus), prediksi arah terlintas (garis bertitik) dan arah ke target lokal S' (garis penuh). Dapat dilihat bahwa faktor bobot 0,6 memberi kecenderungan robot bergerak ke arah teraman dibandingkan arah terlintas. Pada posisi S' pemindaian terhadap lingkungan dan penentuan target S'' dilanjutkan. Pada posisi S'' pemindaian lingkungan menemukan bahwa terdapat sebuah obyek dekat posisi akhir. Dengan demikian robot bergerak ke posisi S''' sebelum pada akhirnya mencapai posisi akhir tanpa tumbukan.

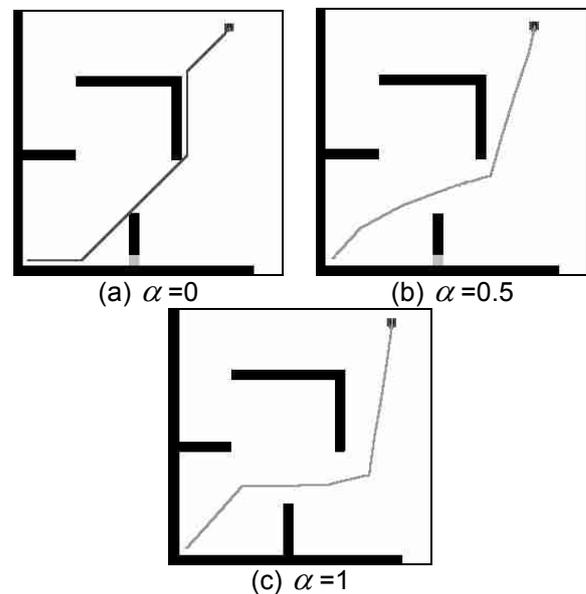


Gambar 8. Pemindaian bertahap

Gambar 8d menunjukkan perbandingan trajektori dengan faktor keamanan dan trajektori

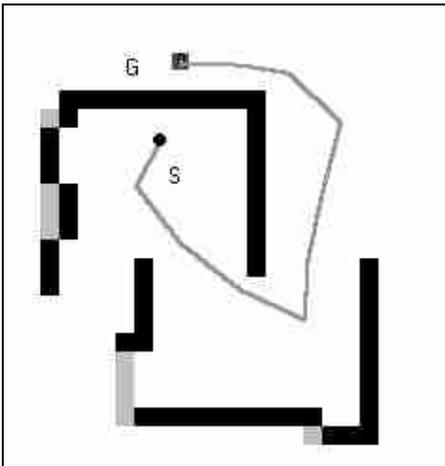
jarak terlintas yang dihasilkan oleh metode *distance transform*. Dapat dilihat bahwa trajektori jarak terlintas cenderung menghantar robot melintas tepat pada sisi obyek-obyek yang berada di lingkungan. Dalam dunia nyata, kondisi seperti ini dapat mengakibatkan tumbukan mengingat informasi dari sensor dan kontrol gerak tidak ada yang sempurna. Sebaliknya, dengan menggunakan faktor keamanan, robot dapat bergerak dengan jarak aman dari obyek di sekitarnya namun tetap konsisten menuju posisi akhir.

Gambar 9 menunjukkan pengaruh faktor keamanan α terhadap trajektori yang terbentuk. Untuk $\alpha=0$ trajektori merupakan jalan terlintas yang menuju posisi akhir, namun membawa robot dekat dengan obyek-obyek disekitarnya. Semakin besar nilai faktor pengaman, maka robot cenderung menempati posisi-posisi yang berjarak aman dari obyek-obyek di sekelilingnya.



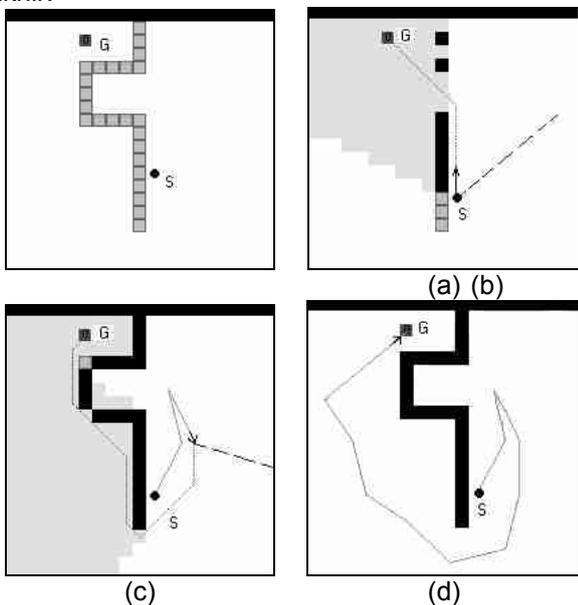
Gambar 9. Pengaruh faktor keamanan terhadap trajektori

Gambar 10 menunjukkan kemampuan dari metode perencanaan trjektori lokal untuk menghantarkan robot keluar dari *culdesac* dan menuju posisi akhir tanpa harus memetakan *culdesac* tersebut sebelumnya



Gambar 10. Keluar dari *culdesac*

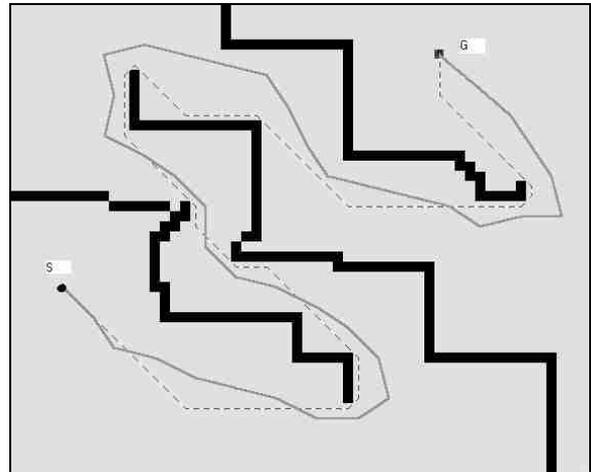
Gambar 11 menunjukkan bagaimana sebuah robot semula menuju ke arah yang bukan seharusnya, namun selanjutnya dapat mengoreksi kesalahannya sehingga dapat mencapai posisi akhir. Dalam Gambar 11a diperlihatkan kondisi lingkungan global yang belum terpindai. Pada Gambar 11b, karena jangkauan sensor yang terbatas, informasi lingkungan belum lengkap sehingga robot mengambil jalan yang tidak seharusnya. Namun setelah pemindaian lingkungan terus diperbarui maka robot dapat mengoreksi kesalahannya dan bergerak menuju arah yang benar menuju posisi akhir.



Gambar 11. Mengkoreksi kesalahan lintasan

Gambar 12 menunjukkan perbandingan antara trajektori jalan terpendas (garis putus) dengan trajektori yang menggunakan faktor keamanan (garis penuh) pada lingkungan yang lebih

kompleks. Dapat dilihat bahwa dengan menggunakan faktor keamanan, trajektori yang dihasilkan memberi jarak aman kepada robot dibandingkan dengan trajektori terpendas.



Gambar 12. Struktur lingkungan yang lebih kompleks

4. KESIMPULAN

Dalam sebuah lingkungan yang dinamis dan tidak terpetakan sebelumnya, pembentukan lintasan untuk robot secara bertahap lebih menguntungkan karena memungkinkan adaptasi dan antisipasi terhadap perubahan struktur lingkungan. Pemindaian lingkungan yang terbatas memang dapat menyebabkan robot mengambil jalan yang tidak seharusnya ditempuh atau terperangkap dalam *culdesac*. Namun simulasi komputer membuktikan bahwa metode yang dibahas dalam makalah ini dapat mengatasi masalah-masalah tersebut.

Telah dibuktikan bahwa lintasan untuk robot selalu dapat dihasilkan meski melalui pemindaian lingkungan yang terbatas. Oleh karena itu penggunaan sensor dengan jangkauan terbatas dapat diberlakukan. Hal ini menunjukkan bahwa metode pembentukan lintasan ini tidak dipengaruhi secara signifikan oleh jangkauan sensor.

Faktor keamanan sangat penting untuk mengurangi kemungkinan terjadinya tumbukan antara robot dengan obyek di sekitarnya. Satu hal yang perlu dicatat, bahwa tidak selamanya lintasan yang optimal adalah lintasan yang terpendas. Dalam industri manufaktur atau di jalan raya misalnya, faktor keamanan lebih menempati prioritas tinggi daripada faktor kedekatan.

DAFTAR PUSTAKA

- Amato and Wu. A randomized roadmap method for path and manipulation planning. In *IEEE Int. Conf. Robotics & Automation*, pages 113-120, 1996.
- Barraquand *et al.* Numerical Potential Field Techniques for Robot Path Planning. *IEEE Transactions on System, Man, Cybernetics*, 22(2), pp. 224-241, April 1992.
- Barraquand and Latombe. Robot Motion Planning: A distributed representation approach. *Int. J. Robotics Research*, 10(6):628-649, 1991.
- Greenberg, M.D. *Advanced Engineering Mathematics*, 2nd ed., Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall, 1998.
- Jarvis, R.A. Growing Polyhedral Obstacles for Planning Collision-Free Paths, *The Australian Computer Journal*, Vol. 15, No 3, pp. 560-570, August 1983.
- Jarvis, R.A. Distance Transform based Path Planning for Robot Navigation. In Y. F. Zheng, editor, *Recent Trends in Mobile Robots*, volume 11 of World Scientific Series in Robotics and Automated Systems, chapter 1, pages 3-31. World Scientific, Singapore, 1993.
- Jarvis, R.A. Mobile Robot Navigation, *3rd National Conference on Robotics*, pp 8-17, Melbourne, June 1990.
- La Valle and Kuffner. Randomized Kinodynamic Planning. In *IEEE Int. Conf. Robotics & Automation*, pages 473-479, May 1999.
- Lipton, A.J. Path Planning for an Unreliable Autonomus Mobile Robot in an Unknown Environment, *Australian Joint Conference on Artificial Intelligence: Workshop on Robotics, Real World AI*, Canberra, November 1995.
- Murray and Jennings. Stereo Vision based Mapping for a Mobile Robot, *IEEE Conf. On Robotics and Automation*, May 1997.
- Nilsson, N.J. *Problem-Solving Methods Artificial Intelligence*, McGraw-Hill, 1971.
- Zelinsky, A. Using Path Transform to Guide the Search for Findpath in 2d, *International Journal of Robotics Research*, 13(4), pp. 315-325, August 1994.

JANGAN DI PRINT (SALAH)

Nilsson, N.J. Problem-Solving Methods in Artificial Intelligence, McGraw-Hill, 1971.

Jarvis, R.A. Growing Polyhedral Obstacles for Planning Collision-Free Paths, *The Australian Computer Journal*, Vol. 15, No 3, pp. 560-570, August 1983.

Jarvis, R.A. Distance Transform based Path Planning for Robot Navigation. In Y. F. Zheng, editor, *Recent Trends in Mobile Robots*, volume 11 of World Scientific Series in Robotics and Automated Systems, chapter 1, pages 3-31. World Scientific, Singapore, 1993.

Jarvis, R.A. Mobile Robot Navigation, *3rd National Conference on Robotics*, pp 8-17, Melbourne, June 1990.

Zelinsky, A. Using Path Transform to Guide the Search for Findpath in 2d, *International Journal of Robotics Research*, 13(4), pp. 315-325, August 1994.

Barraquand and Latombe. Robot Motion Planning: A distributed representation approach. *Int. J. Robotics Research*, 10(6):628-649, 1991.

Barraquand *et al.* Numerical Potential Field Techniques for Robot Path Planning. *IEEE Transactions on System, Man, Cybernetics*, 22(2), pp. 224-241, April 1992.

Amato and Wu. A randomized roadmap method for path and manipulation planning. In *IEEE Int. Conf. Robotics & Automation*, pages 113-120, 1996.

La Valle and Kuffner. Randomized Kinodynamic Planning. In *IEEE Int. Conf. Robotics & Automation*, pages 473-479, May 1999.

Lipton, A.J. Path Planning for an Unreliable Autonomus Mobile Robot in an Unknown Environment, *Australian Joint Conference on Artificial Intelligence: Workshop on Robotics, Real World AI*, Canberra, November 1995.

Murray and Jennings. Stereo Vision based Mapping for a Mobile Robot, *IEEE Conf. On Robotics and Automation*, May 1997.

Greenberg, M.D. *Advanced Engineering Mathematics*, 2nd ed., Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall, 1998.