

STUDI IMPLEMENTASI *MACHINE VISION* PADA PENGEMBANGAN PALETISASI ROBOTIK

Adi Purwanto ¹

ABSTRACT

Industrial robot structuris constructed by two different technology, that are mechanical component and electronic device, named mechatronic technology. It's rapid progress is according to computer technology progress, and relevant to programmable automation system. Robot is one of the programmable automation implementation, which has multifuction and perfor to do many duty or work.

Manufacturing in high competitive environment, indutries must apply felxible production methods to comply with the change of the market demand, product type, rate and production capacity, and just in time an order supply to customer. Flexible Manufacturing System (FMS), is a manufacturesystem that integrate cells in large unit, within industrial robot to serve many machine tools, with all interface connect with central computer. An important concept in manufacturing industry – to support FMS – is “just-in-time production” (JIT), this concept will be working if service unit for component or material handling has high precission and reability.

Another manufacturing system to support the flexible manufacturing are; automated guide vehicle (AGV), and automated storage/retrieval system (AS/RS). This two system can work together with robotic palletization program. Robotic palletization has been progressed to remove an uniform boxes with one size or multi size within material or component suitable to lot size or production batch. Robotic palletization progress has extend until 2D visual sensor. Implementation study need to be improved continously, appropriate to progress of manufacture industry.

Key word: *Robot, machine vision, palletztion*

INTISARI

Struktur robot industri adalah gabungan dari dua teknologi yang berbeda, yaitu komponen mekanik dan elektronik, yang kemudian dikenal dengan teknologi mekatronika. Mekatronika dewasa ini berkembang dengan pesat seiring dengan kemajuan teknologi komputer, yang sangat relevan terhadap bentuk otomasi mampu program. Robot merupakan salah satu implementasi dari otomasi mampu program, yang multi fungsi dengan performansi dapat mengerjakan cukup banyak tugas atau pekerjaan.

Lingkungan dengan tingkat kompetitif yang tinggi, mengharuskan industri manufaktur menggunakan metode produksi yang cukup luwes dalam menanggapi perubahan permintaan pasar, tipe produk, rate dan jumlah produksi, dan penyerahan order tepat waktu kepada kustomer. Sistem manufaktur luwes atau Flexible Manufacturing System (FMS), yakni suatu sistem manufaktur yang mengintegrasikan sel-sel pada unit yang luas, yang mana didalamnya terdapat robot industri untuk melayani beberapa mesin, dengan semua interface berhubungan dengan sentral komputer. Suatu konsep penting pada industri manufaktur - guna mendukung FMS - adalah “just-in-time production” (JIT), konsep ini dapat terwujud jika layanan untuk perpindahan material, atau komponen mempunyai ketepatan dan keandalan yang tinggi.

Sistem otomasi yang lain untuk mendukung manufaktur luwes adalah; automated guided vehicle (AGV), dan automated storage/retrieval system (AS/RS). Dua sistem tersebut dapat bekerja sama dengan robot, untuk suatu program paletisasi robotik. Paletisasi robotik telah berkembang untuk menangani pemindahan kotak-kotak seragam satu ukuran hingga kotak multi ukuran yang berisi material atau komponen sesuai dengan lot size atau batch produksi. Perkembangan paletisasi robotika telah sampai

¹ Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin, ISTA, Yogyakarta

pada pemakaian visual sensor 2D. Studi implementasi perlu terus dikembangkan sesuai dengan tuntutan kemajuan pada industri manufaktur.

Kata kunci: Robot, machine vision, paletisasi

PENDAHULUAN

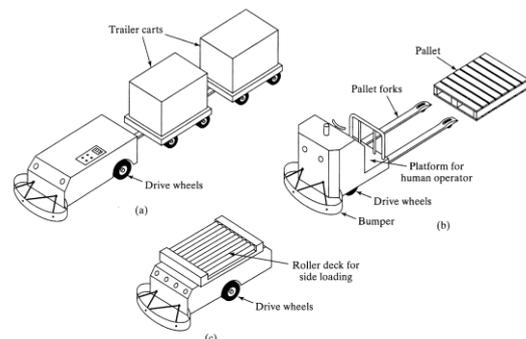
Dengan makin bertambahnya kebutuhan untuk meningkatkan produktivitas, waktu penyerahan produk akhir, dengan kualitas produk yang seragam, maka industri serta merta bergerak ke arah optimasi berbasis komputer. Dewasa ini banyak pekerjaan otomasi manufaktur dikerjakan dengan mesin khusus untuk suatu fungsi tertentu yang sering disebut *fixed or hard automation system*. Sistem ini tidak luwes, dan pada umumnya memerlukan biaya tinggi – bertambahnya ongkos produksi untuk membayar upah para karyawan, sedangkan harga yang diinginkan semurah mungkin – merupakan alasan kuat bagi industri, untuk memilih menggunakan *robot* dengan kemampuan melakukan berbagai fungsi untuk industri manufaktur yang mempunyai lingkungan kerja sangat fleksibel, dengan biaya produksi yang rendah. (Fu, Gonzales, & Lee, 1987).

Kata “robot” berasal dari kata *robota*, bahasa Czechnia yang artinya: karya. Berdasarkan definisi yang dibuat oleh *Robot Institute of America*, sebuah robot adalah manipulator yang dapat diprogram ulang, multi-fungsi, dirancang untuk mengerjakan, memindahkan material, komponen, perkakas dan benda-benda tertentu, melalui suatu pergerakan yang dapat berubah-ubah sesuai dengan program yang ditentukan, sehingga mempunyai performansi untuk dapat mengerjakan cukup banyak pekerjaan. Jika ditinjau dari strukturnya robot industri adalah gabungan dari dua teknologi yang berbeda, yaitu komponen mekanik dan elektronik, yang kemudian dikenal dengan teknologi **mekatronika** (Mulyowidodo, 1996). Mekatronika dewasa ini berkembang dengan pesat seiring dengan kemajuan teknologi komputer, yang sangat relevan terhadap bentuk otomasi mampu program (*programmable automation*) atau otomasi luwes (*flexible automation*). Beberapa hal pokok yang dapat dijadikan pegangan dalam membuat klasemen suatu mesin atau

membedakan antara robot dan mesin otomatis adalah: fleksibilitas, spesifikasi, kontrol memori dan obsolete.

Industri manufaktur, dapat dipastikan hampir selalu berada pada lingkungan dengan tingkat kompetitif yang tinggi, maka metode produksi harus cukup luwes dalam menanggapi perubahan permintaan pasar, tipe produk, rate produksi dan jumlah produksi, serta penyerahan yang tepat waktu pada customer. Oleh karenanya diperlukan sistem otomasi mampu program atau fleksibel, sehingga terbentuk manufaktur luwes atau yang biasa disebut dengan *Flexible Manufacturing System (FMS)*. Yaitu suatu sistem manufaktur yang meng-integrasikan sel-sel pada unit yang luas, yang didalamnya terdapat robot industri untuk melayani beberapa mesin, dengan semua interface yang dihubungkan dengan sentral komputer.

Suatu konsep penting pada industri manufaktur adalah “*just-in-time production*” (*JIT*) atau produksi tepat waktu, yang pada tingkat teknologi tertentu hanya bisa terwujud jika layanan untuk perpindahan material, komponen, atau produk akhir mempunyai ketepatan dan keandalan yang tinggi. Sistem otomasi yang dapat mewujudkan sistem manufaktur luwes adalah gabungan dari; *automated guided vehicle (AGV)*, *robot*, dan *automated storage/retrieval system (AS/RS)*.



Gambar 1. AGV sebagai alat angkut palet.

Sumber: Mikell P. Groover, Automation
Production Systems & Computer-
Integrated Manufacturing

Paletisasi robotika adalah suatu bentuk otomatisasi pemuatan pada palet yang dibuat untuk melayani atau bekerjasama dengan unit AGV atau AS/RS. Saat ini paletisasi robotik telah berkembang untuk menangani pemindahan kotak-kotak seragam satu ukuran hingga kotak multi ukuran yang berisi material atau komponen sesuai dengan *lot size* atau *batch* produksi. Perkembangannya telah sampai pada pemakaian visual sensor – *vidicon tube* atau *charge coupled device* – dengan algoritma perangkat lunak yang telah dapat mengenali bentuk 2D. Studi implementasi perlu terus dikembangkan sesuai dengan tuntutan kemajuan pada industri manufaktur, yang harus luwes dalam menanggapi perubahan permintaan pasar, tipe produk, rate produksi dan jumlah produksi, serta penyerahan yang tepat waktu pada customer

Robot Industri

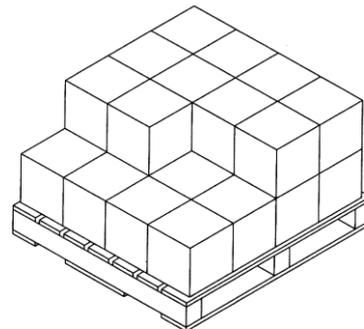
Diperkenalkan pada tahun 1960-an, robot industri yang pertama digunakan untuk operasi berbahaya, seperti penanganan racun dan material radioaktif, dan bongkar muat benda kerja yang panas bersasal dari dapur tinggi yang akan diangkat pada penuangan. Beberapa kaidah jempol untuk pemakaian robot adalah *3D* (*dull, dirty, and dangerous*), dan *3H* (*hot, heavy, and hazardous*).

Dari awalnya robot industri digunakan untuk melindungi pekerja dan keamanan dalam lingkungan pabrik, tetapi kemudian terpengaruh oleh sifat-sifat umum tentang situasi kerja pada perusahaan manufaktur atau industri, cenderung menggunakan robot untuk menggantikan tenaga kerja manusia. Alasan tersebut antara lain:

- (1) Lingkungan kerja yang berbahaya bagi manusia.
- (2) Siklus kerja yang berulang-ulang.
- (3) Pekerjaan atau penanganan yang sulit bagi manusia.

- (4) Operasi kerja dengan banyak pergantian tenaga/karyawan.
- (5) Pergantian urutan kerja dan jumlah produksi yang tidak menentu.
- (6) Pengaturan posisi dan orientasi yang pasti pada sel kerja.

Dewasa ini robot industri dikembangkan dengan tujuan lebih luas dan menjadi komponen penting sebagai sistem atau dalam proses manufaktur. Robot dapat membantu meningkatkan produktivitas, meningkatkan kualitas produk, dan menurunkan biaya karyawan. Jepang sebagai negara dengan industri manufaktur yang mempunyai jumlah robot terbanyak, dengan pertumbuhan yang sangat cepat sekali – 28% pada 1990 (Hitomi, Katsundo, 1993), tetapi dalam kenyataan bahwa generasi muda Jepang tidak suka bekerja dipabrik dengan alasan “**3K**” – **kitsui** (kerja keras), **kitanai** (kotor), dan **kiken** (berbahaya) – sehingga memaksa penerapan otomatisasi dan robot industri berkembang dengan cepat.



Gambar 2. Paletisasi dilakukan oleh robot.

Sumber: Mikell P. Groover, Automation
Production Systems & Computer-
Integrated Manufacturing

Keenam alasan tersebut diatas kemudian digunakan untuk telaah apakah pemakaian robot industri memenuhi kelayakan teknis maupun ekonomis.

Selanjutnya dalam perkembangan pemakaian robot industri adalah untuk keperluan:

- (a) penanganan material, dalam hal ini robot bertugas untuk

- memindahkan material atau suku cadang dari suatu tempat ke tempat yang lain. Untuk dapat menyelesaikan tugas robot dilengkapi dengan griper yang didesain untuk penanganan material yang spesifik.
- (b) transfer material, adalah untuk memungut material atau suku cadang dari suatu tempat, kemudian meletakkannya ditempat yang lain, misal operasi paletisasi. Robot dengan tugas seperti ini juga disebut robot *pick-and-place*.
 - (c) pemuat atau pembongkar mesin, adalah pemakaian robot untuk transfer atau menurunkan suku cadang dari mesin produksi. Contoh operasi dalam hal ini adalah: *die casting, plastic moulding, metal machining operation, forging, press-working, heat treating*, dan lain-lain.
 - (d) pengelas titik, adalah penggunaan robot untuk proses penyambungan dua atau lebih suku cadang berbentuk plat. Robot yang digunakan biasanya berukuran besar dengan daya angkut yang cukup untuk mesin las titik yang berat. Contoh; perakitan kabin, bodi kendaraan.
 - (e) pengelas busur kontinyu, adalah untuk mendapatkan sambungan busur yang kontinyu, karena diskontinuitas harus dihindari pada proses penyambungan kedap dan kuat. Contoh; pengelasan boiler atau reaktor.
 - (f) pengecat dengan menggunakan nosel penyemprot dalam permukaan yang luas dan dalam waktu yang lama adalah berbahaya bagi manusia. Oleh sebab itu tugas ini cocok dikerjakan oleh robot.
 - (g) proses pemesinan, tugas yang mulai banyak dikerjakan oleh robot adalah; *drilling, routing, grinding, wire brushing, waterjet cutting, laser cutting, riveting*, dan lain-lain.

Komponen Robot

Robot industri, tidak berbentuk humanoid – artinya mempunyai anggota atau bagian badan yang lengkap – dengan kemampuan ke-cerdikan buatan yang dibuat mirip dengan manusia, seperti *R2D2 (Ar-too-de-too)* atau *C3PO (See-three-pi-o)* dalam film *Star-Wars*. Tetapi komponen robot terdiri dari; *manipulator, end effector, power supply*, dan *control system*.

Manipulator. Juga disebut *arm and wrist*, sebuah manipulator adalah unit mekanis yang menentukan lintasan (trayektori) sama dengan lengan dan tangan manusia. Ujung dari pergelangan tangan dapat menjangkau suatu titik dalam ruang dengan orientasi spesifik. Terdapat tiga derajat kebebasan masing-masing pada setiap gerakan linier atau rotasi. Manipulator mengangkat beban dengan menggunakan peralatan mekanis, roda-gigi, seperti sambungan (joint) dengan berbagai jenis/bentuk sendi.

End effector. Ujung dari pergelangan tangan robot dilengkapi dengan *end effector*, atau juga disebut *end-of-arm tooling*. Tergantung dari jenis operasinya, *end effector* konvensional dilengkapi dengan pencengkeram, kait, sekop, elektromagnet, mangkok vakum, dan jari rekat, untuk penanganan material, *spray gun* untuk mengecat, perlengkapan untuk las titik, las busur, dan busur pemotong, *power tools*, seperti gurdi, pengunci mur, dan sikat; instrumen pengukur, seperti dial indikator, dan lain sebagainya.

Power supply. Setiap gerakan dari manipulator, dalam arah linier atau sumbu rotasi, dikontrol dan diatur oleh aktuator tersendiri, menggunakan pasokan daya secara elektrik, pneumatik, atau hidrolis.

Control system. Sistem kendali juga diketahui sebagai *controller*, adalah sistem pemrosesan komunikasi dan informasi, yang memberikan perintah untuk pergerakan dari manipulator atau robot. Perangkat pengatur atau pengendali sebagian besar telah

terstandardkan oleh fabrikasi pembuatnya, dan dapat dibagi menjadi tiga jenis yang berbeda, yaitu:

- (a) Otomasi berbasis mikro-prosesor (*μ P based Automation*)
- (b) Otomasi berbasis logika mampu program (*PLC based Automation*)
- (c) Otomasi berbasis personal komputer industri (*IPC based Automation*)

Sistem kendali adalah otak dari robot, yang menyimpan data sebagai awal dan akhir gerakan dari manipulator.

Klasifikasi Robot

Robot industri dapat diklasifikasikan berdasar pada beberapa kriteria, diantaranya adalah:

- a. Berdasarkan sistem koordinat robot, dibedakan menjadi: (Sharon, et. al., 1992)
 1. Sistem *Anthropomorphic* atau sistem artikulasi,
 2. Sistem *Cartesian* atau sistem XYZ
 3. Sistem *Cylindrical*,
 4. Sistem *Spherical* atau sistem polar,
 5. Sistem *SCARA (Selective Compliant Assembly Robot Arm)*
- b. Berdasarkan cara pemasangan, robot dibedakan menjadi: (Kalpakjian, 1995)
 1. *permanently robot*, dipasang secara permanen pada *manufacturing plant*,
 2. *gantry robot*, bergerak sepanjang *overhead rails*,
 3. *mobile robot*, dilengkapi dengan roda untuk bergerak pada lantai pabrik.
- c. Berdasarkan kontrol atau pengendaliannya, robot dibedakan atas:
 1. *Fixed and variable-sequence robot*. Robot *fixed-sequence*, juga disebut *pick-and-place robot*, adalah robot yang sederhana dan relatif murah yang diprogram untuk operasi dengan urutan gerak yang spesifik, bergerak dari titik ke titik (*point-to-point*), serta

siklusnya diulang terus menerus. Robot *variable-sequence* dapat diprogram untuk urutan gerak yang spesifik dari suatu operasi, dan dapat diprogram kembali dengan urutan yang lain.

2. *Play back robot*. Adalah robot yang pemrograman dari lintasan gerak yang diinginkan dilakukan dengan mengajarkan atau me-nuntun *effector* atau *teaching handle*, *teaching arm* atau *teaching pendant*.
3. *Numerically controlled robot*. Adalah robot dengan servo-kontrol dari data digital, yang urutan geraknya dapat diubah relatif lebih mudah, layaknya seperti pada pemrograman dan pengoperasian mesin kendali numerik.
4. *Intelligent (sensory) robot*. Adalah robot yang mampu melakukan beberapa fungsi dan tugas yang biasa dilakukan oleh manusia. Robot ini dilengkapi dengan ber-macam sensor dengan kemampuan *visual*, *tactile*, dan sensor fusi atau *smart sensor*, sehingga dapat mengobservasi dan evaluasi terhadap lingkungan dan kedekatannya terhadap obyek – permesinan, dlsb. – hingga mempunyai persepsi dan mampu mengenali pola. Kemudian membuat keputusan untuk melakukan gerakan berdasarkan kecerdikan yang dimiliki tersebut.

2.3. Aplikasi dan Pemilihan Robot

Faktor yang berpengaruh untuk pemilihan robot pada *manufacturing plants* adalah:

- (a) kapasitas pengangkutan beban,
- (b) kecepatan gerakan,
- (c) keandalan,
- (d) keterulangan,
- (e) konfigurasi lengan,
- (f) derajat kebebasan,
- (g) sistem kendali,
- (h) *program memory*, dan
- (i) *work envelope*.

Sedangkan penggunaan robot industri, sebagian besar adalah meliputi beberapa pekerjaan untuk penanganan material, bongkar-muat, dan pemindahan

material pada operasi manufaktur; pengelasan titik seperti pada industri otomotif, untuk memperoleh hasil pengelasan dengan kualitas yang baik; operasi pemesinan, seperti *deburring*, *grinding*, *polishing*, dengan pemakaian perkakas yang dipasangkan pada *end-effectomya*, serta untuk perakitan secara otomatis, inspeksi dan pengukuran.

Penglihatan Robot

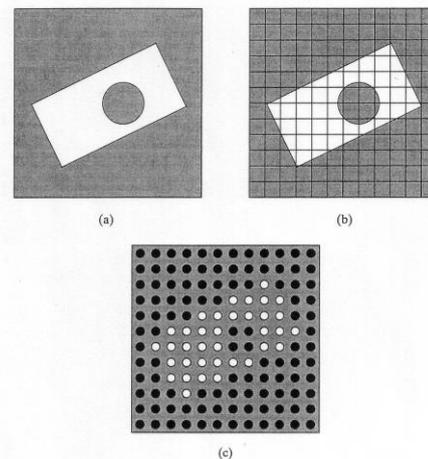
Agar robot mampu melakukan beberapa fungsi dan tugas seperti yang biasa dilakukan oleh manusia, maka robot perlu dilengkapi dengan sensor *visual* dan sensor perasa. Robot yang mempunyai sensor penglihatan termasuk dalam *intelligent (sensory) robot*, sedangkan sensor penglihatan sendiri yang dikenal sebagai *Machine or Computer Vision*, adalah termasuk dalam kecerdasan buatan atau *artificial intelligence (AI)*. Yakni, bagian dari ilmu pengetahuan komputer yang berkenaan dengan sistem yang menunjukkan karakteristik umum yang berhubungan dengan kecerdasan dan perilaku manusia, seperti belajar, alasan, memahami bahasa, dan lainnya yang disimulasikan dengan menggunakan komputer. Elemen dari kecerdasan buatan meliputi: *expert system*, *natural language processing*, *artificial neural network*, *machine or computer vision*, dan *fuzzy logic*.

Penglihatan robot dapat didefinisikan sebagai proses ekstraksi, pengkarakteran, dan interpretasi informasi citra 3D. Proses yang umum digunakan pada *machine* atau *computer vision*, dapat dibagi menjadi enam bidang prinsipal, yaitu: (1) *sensing*, (2) *pre-processing*, (3) *segmentation*, (4) *description*, (5) *reqocnition*, dan (6) *interpretation*.

Proses *sensing* menghasilkan citra pandang. Pada pemrosesan awal dilakukan tentang teknik penurunan derau, dan peningkatan detail. Segmentasi adalah proses partisi citra pada obyek yang dituju. Deskripsi adalah proses komputasi dari pemandangan (misal, ukuran, bentuk) yang cocok untuk membedakan satu jenis obyek dengan lainnya. Reqoknisi adalah proses identifikasi obyek (misal; kunci, baut, blok mesin). Dan yang terakhir interpretasi,

adalah penunjukan secara utuh untuk sebuah obyek yang dikenali. Pada *machine* atau *computer vision*, terdapat tiga tingkatan pemrosesan citra, yaitu: *low*, *medium*, dan *high level vision*.

Akuisisi citra. Informasi visual dikonversi menjadi sinyal listrik dengan menggunakan visual sensor. Jika suatu contoh berbentuk spatial atau kuantis, sinyalnya akan menghasilkan citra digital. Prinsip dari peralatan yang digunakan pada penglihatan robot adalah kamera televisi, yang mempunyai sensor citra berbentuk tabung atau *solid-state*, dengan tambahan beberapa komponen elektronik.



Gambar 3. Matriks dari element gambar.

Sumber: Mikell P. Groover, *Automation Production Systems & Computer-Integrated Manufacturing*

Pada Gambar 2. ditunjukkan bagaimana proses digitalisasi pada sensor visi. Gambar 2(a) adalah tampak lensa, 2(b) matriks 12 x 12 superimposed tampak lensa, dan 2(c) adalah nilai intensitas piksel yang dibedakan sebagai warna hitam dan putih.

Tabung vidicon atau *vidicon tube* umumnya digunakan sebagai kamera TV, intinya adalah tabung gelas hampa udara yang besar dengan prinsip kerja berkebalikan dengan televisi. Keluaran tabung *vidicon* berbentuk analog, sehingga diperlukan proses *pendigitalan*. Kamera CCD atau *charge-coupled*

devices (CCDs) adalah penemuan yang lebih akhir, dikenal sebagai kamera *solid state*. Dasar kamera CCD adalah elemen-elemen yang peka cahaya. Masing-masing elemen dapat "dibaca" oleh komputer, dengan keluaran yang berbentuk digital.

Penggunaan pada paletisasi robotika, cukup menggunakan kamera dengan resolusi rendah (64 x 64 *pixel*) atau kamera dengan resolusi sangat rendah (50 x 50 *pixel*), karena bentuk kotak mudah dikenali, yang diperlukan hanya mendeteksi ukurannya.

Penggunaan kamera dengan resolusi tinggi membutuhkan memori yang lebih besar, sehingga pemrosesan citra lebih lama serta peningkatan biaya peralatan sebanding dengan jumlah "*pixel*" (singkatan "*picture cell*").

Teknik Iluminasi. Iluminasi pemandangan, merupakan faktor penting yang berpengaruh terhadap kompleksitas algoritma penglihatan. Penerangan sembarang dari lingkungan sering kali tak dapat diterima karena dapat menghasilkan citra kurang kontras, refleksi bebas, bayangan, dan detail yang tidak jelas. Perencanaan sistem iluminasi pandangan yang baik harus dapat meminimasi kompleksitas hasil citra, sehingga informasi yang diharapkan untuk deteksi dan ekstraksi obyek dapat ditingkatkan.

Terdapat empat prinsip penggunaan iluminasi dalam ruangan robot, dengan penggunaan yang spesifik, yaitu (Fu, Gonzales, & Lee, 1987) ; (1) *diffuse lighting*, (2) *back lighting*, (3) *structured lighting*, dan (4) *directional lighting*.

Transformasi Perspektif.

Transformasi perspektif juga disebut *imaging transformation*, adalah proyeksi titik 3D pada bidang. Transformasi perspektif memainkan peran inti pada pemrosesan citra, sebab memiliki aproksimasi pada kebiasaan mana suatu citra dibentuk dalam pandangan 3D. Jika pusat bidang citra terletak pada garis, dan pusat koordinat lensa (0,0,λ), serta kamera terfokus dengan jarak tertentu terhadap obyek, maka λ panjang fokus lensa.

Koordinat bidang citra dari proyeksi titik 3D dapat dituliskan sebagai berikut:

$$x = \frac{\lambda X}{\lambda - Z} \quad \text{dan} \quad y = \frac{\lambda Y}{\lambda - Z}$$

dalam hal ini, X, Y, dan Z adalah *world koordinat*, sehingga:

□ *cartesian world koordinat*,
 $w = \{xyz\}$ *)

□ *homogeneous koordinat*,

$$w_h = \begin{bmatrix} kx \\ ky \\ kz \\ k \end{bmatrix}$$

□ *perspective transformation matrix*,

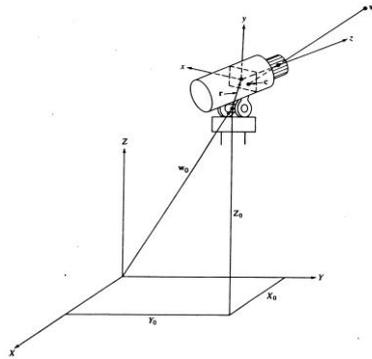
$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\lambda} & 1 \end{bmatrix}$$

Sehingga akan menghasilkan vektor, c_h

$$c_h = Pw_h = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\lambda} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} kX \\ kY \\ kZ \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} kX \\ kY \\ kZ \\ -\frac{kZ}{\lambda} + k \end{bmatrix}$$

*) Penyederhanaan penulisan matriks kolom menurut Stroud, K.A.

Model Kamera. Jika sebuah kamera penglihatan robot ditempatkan pada gimbal, seperti pada gambar dibawah:



maka transformasi matriks *world coordinat gimbal*, adalah:

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_0 \\ 0 & 1 & 0 & -Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriks dua rotasi, dapat berurutan pada matriks tunggal, $R = R_\alpha R_\theta$, kemudian

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta\cos\alpha & \cos\theta\cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ \sin\theta\sin\alpha & -\cos\theta\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Akhirnya, perpindahan dari *origin of image plane* oleh vektor r , menghasilkan transformasi matriks:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -r_1 \\ 0 & 1 & 0 & -r_2 \\ 0 & 0 & 1 & -r_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dengan menggunakan w_h , urutan transformasi $CRGw_h$, dapat dibawa bersama antara koordinat dunia dan koordinat kamera. Representasi koordinat kamera homogen, adalah:

$$c_h = PCRGw_h$$

sehingga, diperoleh *cartesian coordinat* (x,y) , sebagai berikut:

$$x = \lambda \frac{(X - X_0)\cos\theta + (Y - Y_0)\sin\theta - r_1}{-(X - X_0)\sin\theta\sin\alpha + (Y - Y_0)\cos\theta\sin\alpha - (Z - Z_0)\cos\alpha + r_3 + \lambda}$$

dan

$$y = \lambda \frac{(X - X_0)\cos\theta\cos\alpha + (Y - Y_0)\cos\theta\sin\alpha + (Z - Z_0)\sin\alpha - r_2}{-(X - X_0)\sin\theta\sin\alpha + (Y - Y_0)\cos\theta\sin\alpha - (Z - Z_0)\cos\alpha + r_3 + \lambda}$$

Segmentasi dan Deskripsi Struktur

3D. Pada studi implementasi *machine vision* untuk pengembangan paletisasi robotik ini, jika kotak-kotak yang tersedia dengan tinggi yang sama - kotak terdiri dari 4 ukuran berbeda dengan tinggi yang sama, (George, Abdou, 1992)-maka penginderaan dan rekognisi kotak oleh sensor penglihatan akan lebih sederhana. Tetapi jika kotak dibuat dengan ukuran $L \times W \times H$ berbeda, maka diperlukan segmentasi dan deskripsi struktur 3D.

Adapun informasi 3D tentang pemandangan dapat diperoleh melalui tiga cara yang digunakan, yaitu:

- 1) *range sensing*, diperoleh koordinat $(x, y, \text{ dan } z)$ dari permukaan obyek,
- 2) *stereo imaging device*, menghasilkan koordinat 3D, yang merupakan informasi dari *voxel* (pixel 3D), pada setiap titik koordinat $f(x, y, z)$, dan
- 3) *infer 3D*, adalah hubungan dari citra 2D tunggal dari pemandangan, kadang-kadang dianggap sebagai informasi $2 \frac{1}{2} D$.

Adapun teknik yang dapat diterapkan untuk penginderaan struktur 3D, khusus-nya kotak multi-dimensi untuk paletisasi robotik ini, diantaranya adalah:

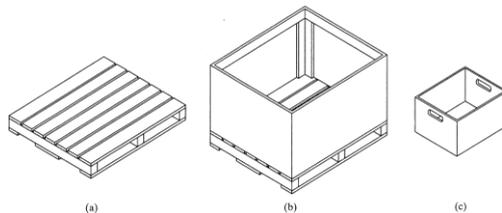
- *Fitting Planar Patches to Range Data*
- *Use of Gradient*

Algoritma Paletisasi

Palet

Palet adalah suatu alat yang berbentuk papan, yang digunakan dalam proses produksi dalam arah untuk menurunkan waktu persiapan (*setting-up time*). Dalam konsep produksi tepat

waktu, salah satu komponen biaya yang harus ditekan adalah biaya untuk persiapan sebelum mesin beroperasi. Biaya yang dimaksud adalah biaya yang timbul selama proses persiapan, karena biaya merupakan fungsi dari waktu, maka jika waktu persiapan dapat dipangkas, akan dapat menurunkan biaya produksi.



Gambar 4. Palet, dan macam-macamnya

Sumber: Mikell P. Groover, Automation Production Syatems & Computer-Integrated Manufacturing

Pada proses pembuatan komponen custom dan perakitan memerlukan mesin, per-lengkapan dan alat bantu. Dalam hal ini biaya produksi sangat ditentukan oleh banyaknya tahapan proses dan waktu pemesinan.

Waktu pemesinan komponen dapat dihitung dengan formula berikut:

$$T_{tools} = T_{setting-up} + T_{machining} + T_{auxilliary} + T_{delay}$$

Dewasa ini, pada mesin-mesin produksi ini telah banyak dibuat atau dilakukan otomasi dalam arah untuk menurunkan waktu pengerjaan. Setiap item waktu dilakukan usaha penurunan dalam arah untuk menekan biaya produksi.

Salah satu item waktu yang signifikan untuk dipangkas adalah waktu persiapan (*setting-up time*). Sebelum 1981 perusahaan Amerika dan Eropa banyak menghabiskan waktu *setting-up* dua sampai beberapa jam, atau bahkan memerlukan sehari untuk persiapan. Pada 1970, Toyota telah berhasil memperpendek waktu *setting-up* mesin press 800 Ton untuk kap dan spatbor menjadi tiga menit. Sehingga kemudian

lahir istilah *penyiapan tunggal* dan *penyiapan sekali sentuh*.

Penyiapan tunggal: adalah waktu penyiapan yang dilakukan kurang dari 10 menit (kurang dari 9' 59" atau terdiri atas angka tunggal/satu digit).

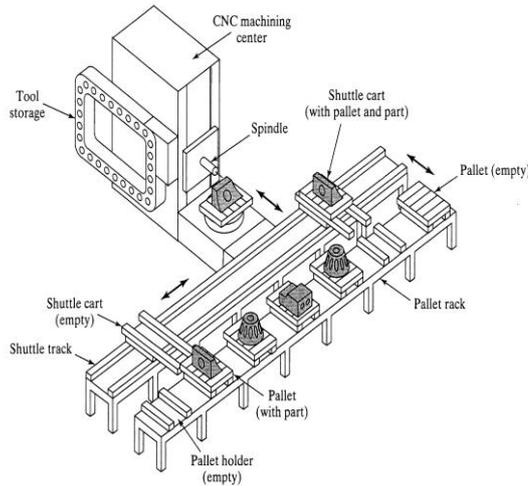
Penyiapan sekali sentuh: adalah waktu penyiapan – dalam banyak kasus – kurang dari satu menit. Contoh; *single minute exchange dies (SMED)*, *quick exchange tools (QET)*, *quick acting nut (QAN)*, dan lain-lain.

Pada proses pemesinan, terdapat 2 (dua) jenis waktu persiapan, yaitu: a) persiapan internal dan b) persiapan eksternal. Persiapan internal adalah persiapan yang harus dilakukan dimana mesin harus dalam keadaan berhenti, sedangkan persiapan eksternal adalah persiapan di luar mesin, sehingga dapat dilakukan tanpa mesin pro-duksi harus berhenti.

Palet adalah salah satu alat yang digunakan untuk melakukan persiapan eksternal, yakni persiapan yang dapat dilakukan secara paralel saat mesin produksi sedang bekerja. Beberapa jenis palet, seperti pada Gambar 1, terdiri dari (a) palet kayu, (b) palet kotak, dan (c) tote box.

Paletisasi

Paletisasi adalah suatu bentuk otomasi pemuatan pada palet yang dibuat untuk melayani mesin perkakas atau mesin produksi. Proses pelayanan palet bekerja-sama dengan alat seperti; roller conveyor, shuttle cart, shuttle track, pallet rack, unit AGV atau AS/RS.



Gambar 5. Palet, dan media tranfernya

Sumber: Mikell P. Groover, Automation Production Syatems & Computer-Integrated Manufacturing

Paletisasi robotik telah berkembang untuk menangani pemindahan kotak-kotak seragam satu ukuran hingga kotak multi ukuran yang berisi material atau komponen sesuai dengan *lot size* atau *batch* produksi.

Berdasarkan teknik penginderaan yang ditetapkan untuk paletisasi 2D – terdiri dari kotak 4 tipe ukuran dengan tinggi yang sama – dapat dibuat algorithma sebagai dasar penyusunan program sekuen gerak yang harus dikerjakan oleh robot.

Penyusunan algorithma dibatasi oleh dua hal, yaitu:

- (1) tinggi semua kotak dispesifikasikan sebagai dimensi vertikal, dan tidak dapat ditukar sebagai dimensi panjang atau lebar kotak,
- (2) luasan total kotak pada setiap *layer*, tidak boleh melebihi luas *layer* dibawahnya atau luasan palet untuk *layer* kotak paling bawah, dengan kata lain kotak tidak diperbolehkan menggantung.

Sedangkan tujuan utama dari penyusunan algorithma adalah untuk: (a) memaksimalkan penggunaan tempat diatas palet, (b) meminimalkan luasan

WIP, (c) meminimalkan waktu gerak robot, (d) meminimalkan waktu bongkar-muat dari/dan pada luasan WIP, (e) meminimalkan sudut penyimpanan kritis dari kotak, dan (f) memaksimalkan tinggi penumpukan kotak.

Kendala pada Paletisasi.

Kendala yang dimasud dalam hal ini adalah pola penyusunan empat ukuran kotak relatif terhadap ukuran palet, yaitu:

1. Luasan kotak pada setiap *layer* tidak boleh melebihi luasan *layer* kotak yang bertumpu pada palet.

$$L_k * W_k - \sum_{i=1}^N X_{ik} * L_i * W_i \geq 0; \forall k \quad (1)$$

2. Total panjang dan lebar kotak yang terletak sepanjang *layer* diatas palet tidak boleh lebih besar dari panjang *layer* kotak yang bertumpuan.

$$L_k - \sum_{i=1}^N L_i + W * i \geq 0; \forall k \quad (2)$$

3. Total panjang dan lebar dari kotak yang terletak disepanjang lebar *layer* tertentu dari palet tidak boleh lebih panjang dari lebar *layer* yang bertumpuan.

$$W_k - \sum_{i=1}^N W_i + L * i \geq 0 \quad (3)$$

4. Dimensi dari *layer* atas harus kurang dari atau sama dengan *layer* dibawahnya.

$$L_k - L_{k+1} \geq 0; \forall k \quad (4)$$

$$W_k - W_{k+1} \geq 0; \forall k \quad (5)$$

Kendala pada Sub-area. Terjadi dalam dua hal, yaitu:

1. Untuk orientasi normal, kotak diletakkan paralel,

$$L_z - L_i \geq 0 \quad (6)$$

$$W_z - W_i \geq 0 \quad (7)$$

2. Untuk kotak yang diputar 90° dari orientasi normal, kotak diletakkan tegak lurus.

$$L_z - W_i^* \geq 0 \quad (8)$$

$$W_z - L_i^* \geq 0 \quad (9)$$

Kendala pada Work-in-Process.

Luasan WIP setiap saat selama operasi dibatasi oleh luasan permukaan dari palet.

$$L_p W_p - \sum_{i=1}^M L_i^* W_i \geq 0 \quad (10)$$

Langkah utama untuk penyusunan algorithma:

- (1) Kotak datang dengan urutan acak,
- (2) Jika seluruh subarea tersisa pada layer spesifik tidak muat untuk antrian kotak berikutnya, pe-muatan dimulai pada layer berikutnya,
- (3) Dalam kasus dimana kotak terbesar dipilih untuk subarea tersisa masih terlampau besar, algoritma akan mengecek layer yang lain,
- (4) Jika lebih dari sub area pada palet – untuk kotak terpilih – algorithma akan memilih subarea terkecil,

$$\|L_z/L_i\| * \|W_z/W_i\|$$

dan

$$\|L_z/W_i\| * \|W_z/L_i\|$$

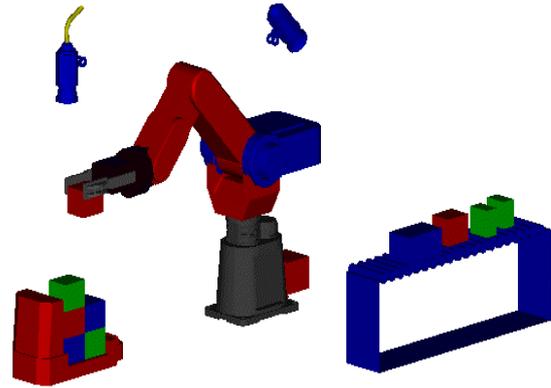
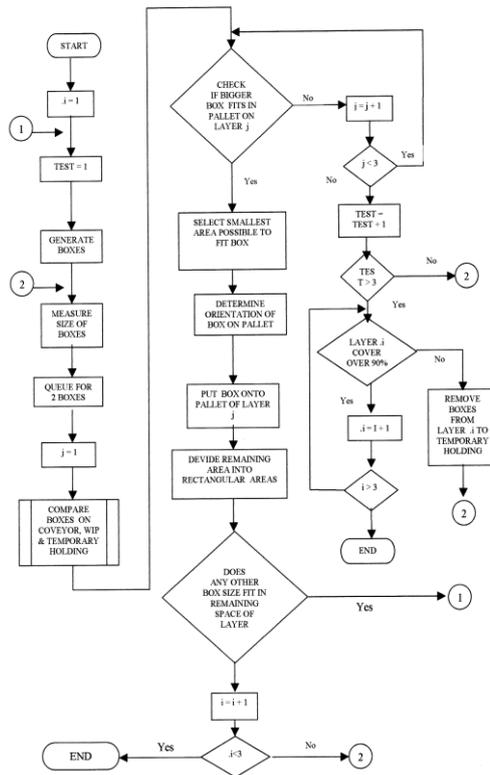
- (5) Sesudah kotak termuat pada sub-area palet, dan luasan tersisa yang kosong dibatasi menjadi subarea segi-empat yang baru. Heuristik/ kaidah jempol digunakan untuk mem-batasai agar subarea baru me-mungkinkan untuk penempatan kotak dengan ukuran lebih besar.

Diagram alir dari algorithma paletisasi robotik dapat dilihat dalam bagan di bawah.

Tabel 1. Nomenklur algorithma paletisasi.

<i>Latin</i>	<i>Arti</i>
<i>L</i>	panjang
<i>W</i>	lebar
<i>N</i>	jumlah perbedaan tipe kotak
<i>K</i>	jumlah layer pada palet
<i>M</i>	jumlah kotak pada WIP
<i>L*</i>	panjang kotak termuat sepanjang W palet
<i>w*</i>	W palet
<i>T</i>	panjang kotak termuat sepanjang L palet
<i>t</i>	waktu untuk robot bergerak menuju palet
<i>x</i>	waktu untuk robot bergerak menuju WIP
	jumlah kotak
<i>Subscrip</i>	<i>Arti</i>
<i>t</i>	
<i>i</i>	tipe kotak termuat pada palet, <i>i</i> = 1, 2, 3, N.
<i>j</i>	tipe kotak termuat pada WIP, <i>j</i> = 1, 2, 3, N
<i>k</i>	jumlah layer termuat, <i>k</i> = 1, 2, 3, K
<i>p</i>	indeks untuk palet
<i>z</i>	indeks untuk sub-area pada palet

Diagram alir algoritma peletisasi



Gambar 6. Analisis kinematik, gerakan dan waktu.

Analisis gerakan atau analisis kinematik adalah analisis terhadap properti geometrik dari manipulator, untuk memperoleh gerakan yang diinginkan. Dalam hal ini, termasuk dalam properti geometrik adalah; per-pindahan, kecepatan, dan percepatan. Tujuan dari analisis kinematik adalah untuk menentukan batas gerakan, interferensi, dan kondisi geometrik yang optimum dengan mensimulasi gerakan obyek (manipulator) dalam *solid model* atau *3D model*. Analisis dan studi tentang gerakan dan waktu ini sangat membantu untuk identifikasi problem inter-ferensi, perubahan gaya selama manipulator beroperasi, sebelum implementasi yang sebenarnya.

Perangkat lunak

Studi implementasi paletisasi robotik ini hanya dilakukan dengan teknik berbasis komputer untuk mengkalkulasi parameter operasional, fungsional, dan proses manufaktur. Cukup banyak perangkat lunak yang digunakan untuk analisis gerakan. Dalam studi implementasi ini perangkat lunak yang digunakan adalah perangkat lunak komersial *ICAD*, dengan pertimbangan perangkat lunak ini mempunyai kemampuan sebagai berikut:

- (a) *wire frame modeling*,
- (b) *surface modeling*,
- (c) *solid modeling*,
- (d) *manufacturing modul*,
- (e) *analysis tool; plastic, dynamic, fluid flow analysis*,
- (f) *intelligent modeling capabilities*.

PENUTUP

Eksperimen tentang masalah paletisasi robotik telah pernah dilaksanakan oleh Abdou & Lee (1992), dari Natural Science and Engineering Research Council dari Kanada, dan telah memberikan sumbangan yang sangat berarti bagi industri manufaktur. Festo Didactic (1998) telah membuat peraga pembelajaran sistem parkir mobil yang dapat membedakan jenis dan warna mobil dengan sukses. Implementasi di bidang industri dilakukan oleh Festo, adalah seleksi warna dan paletisasi untuk produk *ceramic tile* di salah satu perusahaan. Mikell P. Groover, dalam tulisannya *Industrial Robot Application*, menjabarkan bahwa salah satu penggunaan robot adalah untuk *palletizing operation* terutama untuk

penyusunan kotak suku cadang yang seragam. Dalam studi implementasi ini dicoba untuk 4 (empat) tipe kotak dengan tinggi yang sama, tetapi masing-masing kotak mempunyai luas (L x W) kelipatan $\frac{1}{2}$ dari ukuran luas terbesar, seperti pada pembagian kertas deret A.

Paletisasi robotik merupakan bagian dari transportasi material dari *work station* ke *work station* berikutnya, penyimpanan di gudang, atau bentuk penanganan material/ produk lainnya, sehingga mutlak tak dapat diabaikan baik dari segi kelancaran kerja maupun dari segi biaya produksi. Dari studi tentang paletisasi telah dapat menghasilkan ukuran spesifik palet dan kotak, penghematan waktu dan tempat kerja.

Eksperimen tersebut pada dasarnya masih dapat dikembangkan lebih lanjut untuk:

- (1) ukuran kotak majemuk, dengan tinggi yang tidak sama atau variasi dimensi dalam tiga koordinat.
- (2) paletisasi robotik terpadu yang kompetibel dengan beberapa jenis *storage modul*, *part handling* pada *production line* yang terdapat pada FMS, seperti: a). *programmable rack carriage (PRC)*, b). *automated storage/retrieval system (AS/RS)*, c). *automated guided vehicle system (AGV)*, dan d). *pick-up & deposit station (P&D)*.

Kendala dalam mewujudkan studi *machine vision* untuk pengembangan paletisasi robotik, menjadi implementasi yang sesungguhnya memerlukan perangkat keras, perangkat lunak, dan biaya yang memadai. Pembuatan perangkat keras untuk keperluan studi pada bidang ini membutuhkan waktu dan dana yang cukup. Sebagai pengganti dapat dibuat peragaan visual, dengan menggunakan perangkat lunak *AutoCAD 3D-solid rendering image*, *Visual Basic*, *Pro Model* atau *ICAD* atau perangkat lunak yang lain untuk peragaan *robot manipulator*, *automated guided vehicle (AGV)*, *automated store/retrieval system (AS/RS)*.

Analisis modeling ini, sangat membantu perangkat lunak dalam proses pembelajaran dengan metode sistem

konkrit manufaktur. Tanpa menggunakan model, sulit untuk berabstraksi, atau tidak berkembang tanpa implementasi dari perangkat keras dan/atau perangkat lunak, dalam kaitan untuk mengikuti perkembangan pengetahuan tentang robotika.

DAFTAR PUSTAKA

- Fu, King Sun; Gonzales, R.C., and Lee, C.S.G., "*Robotic: Control, Sensing, Vision, and Intelligence*", 1st Editions, chapter 1-10, McGraw-Hill Book Company, New York (1987)
- Mulyowidodo, dan Djodikusumo, "*MEKATRONIKA*", Edisi 1, p.1-p.5, JICA-HEDS Project, Bandung (1996)
- Hitomi, Katsundo, "Manufacturing Technology in Japan", *Journal of Manufacturing System*, Vol 12 No. 3, 209-215, (1993).
- Sharon, D., Harstein, J., and Yantian, G.; penerjemah: Yanto Sutrisno, Muclison Mas'udi, "*Robotic and Automated Mnuufacturing*", Elex Media Komputindo, PT., Jakarta (1992)
- Kalpakjian, Serope, "*Manufacturing engineering and Technology*", 3rd Editions, chapter 38-39, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts (1995)
- Abdou, George, and Lee, Edric, "Contribution to the Development of Robotic Palletization of Multiple Box Size", *Journal of Manufacturing System*, Vol.11-No.3, 160-166, (1992)
- Wahidin Wahab, DR., Ir., M.Sc., "*Sistem Robotika: Desain dan Implementasinya*", Institut of Electrical and Electronic Enginners, Inc. – Indonesia Section, FTUI, Jakarta (1990)
- Hadrecky, S., "Flexible Manufacturing System with EMCO Training Philosophy", *Product Presentation*, FT-UGM, Yogyakarta (1991)
- Deseesard, J.F., "Colibri Exavision, La Plus Petite Camera du Monde", *Diagonal, L'equipe du CEDUST*, No.3, p. 8-9, Jakarta (1994)

Mikell P. Groover, "Automation
Production Syatems & Computer-
Integrated Manufacturing", 2nd
Edition, Prentice Hall International,
Inc., (2005)