

071

A

PRZEMYSŁOWY INSTYTUT AUTOMATYKI I POMIARÓW

PIAP

Al. Jerozolimskie 202

02-486 Warszawa

Samodzielna Pracownia Oprogramowania Systemów POS

Główny wykonawca: mgr inż. Zbigniew Pilat

Wykonawcy: mgr inż. Małgorzata Jacórzyńska Śmigiera
mgr inż. Marek Petz

Konsultanci: Myrian Bishop - BNFL, Wielka Brytania
Eric Malotaux - CRIF, Belgia

Nr zlecenia: 1484E

Tytuł: Odwrotne zadanie kinematyczne dla robotów redundantnych w kontekście projektu INGRID. Etap 1: Prace studialne. Zakup oprogramowania. Implementacja oprogramowania wspomagającego na PC (symulacja robota, interfejs do pakietu ROBCAD).

Zleceniodawca: Praca realizowana ze środków Unii Europejskiej (CEC) w programie TELEMAN, we współpracy z BNFL i CRIF w ramach tematu INGRID-PECO.

Pracę rozpoczęto dnia: 1994.06.15.

zakończono dnia: 1994.10.31.

Kierownik Ośrodka

mgr inż. Zbigniew Pilat

Dyrektor Pionu

dr inż. Jan Jabłkowski

Praca zawiera:

Rozdzielnik - ilość egz.:

stron 6
rysunków --
fotografii --
tabel --
tablic --
załączników 9

Egz. 1 POS
Egz. 2 POS
Egz. 3 BOINTE
Egz. 4
Egz. 5
Egz. 6

Nr rej. 7145

1

Analiza deskryptorowa:

ROBOTY PRZEMYSŁOWE, PLANOWANIE TRAJEKTORII, KINEMATYKA ODWROTNA
DLA ROBOTÓW REDUNDANTNYCH

Analiza dokumentacyjna:

Sprawozdanie zawiera opis prac zrealizowanych w ramach pierwszego etapu zlecenia obejmującego umowę z BNFL dotyczącą udziału PIAP w projekcie INGRID programu TELEMAN, finansowanego przez Unię Europejską.

Tytuły poprzednich sprawozdań:

Niniejsze sprawozdanie jest pierwszym dokumentem przedstawiającym przebieg realizacji pracy.

1. Wstęp

Program badawczy TELEMAN finansowany przez Unię Europejską skupia się m.in. na wprowadzeniu nowoczesnej techniki, w tym robotów czy nawet szerzej maszyn manipulacyjnych, do obszarów pracy człowieka, w których zdrowie lub wręcz życie ludzkie jest zagrożone. Typowymi przykładami takich miejsc są różnego rodzaju instalacje chemiczne i nuklearne. Zarówno ich bieżąca obsługa i konserwacja jak i przede wszystkim interwencje w sytuacjach awaryjnych wykonywane przez ludzi wiążą się z ryzykiem. Dlatego też próbuje się wdrożyć do pracy w tych niebezpiecznych środowiskach roboty. Taki jest też cel projektu INGRID realizowanego w ramach programu TELEMAN. Prowadzący projekt postawili sobie zadanie zbudowanie inteligentnego robota portalowego do dystrybucji materiałów promieniotwórczych. Efekty pracy będą w pierwszej kolejności sprawdzane i wykorzystane w brytyjskim centrum dystrybucji paliw jądrowych dla elektrowni - BNFL. Firma ta jest też głównym koordynatorem projektu. W realizacji tematu biorą udział przedsiębiorstwa oraz instytucje naukowo-badawcze z całej Wspólnoty Europejskiej:

- AEA Technology Remote Handling and Robotics Department - Wielka Brytania,
- CRIF/WTCM - Bruksela, Belgia,
- Instytut Materiałoznawstwa Uniwersytetu w Hanowerze - Niemcy,
- Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) - Niemcy,
- CEN/SCK - Belgia,
- Siemens - Niemcy,
- Grupa Badawcza Robotyki Uniwersytetu w Oxfordzie - Wielka Brytania,
- Risoe National Laboratory - Dania,
- Grupa Robotowa Wydziału Inżynierii Uniwersytetu w Newcastle - Wielka Brytania,
- Advanced Robotics Research Ltd. - Wielka Brytania.

W roku 1994 program TELEMAN został rozszerzony pod kątem wprowadzenia do prac przy jego realizacji instytucji z państw środkowej i wschodniej Europy. Rozszerzone projekty zachowały dotychczasowe nazwy otrzymując dodatkowo drugi człon: PECO. W ramach INGRID-PECO Instytut PIAP włączył się do projektu INGRID. Celem rozszerzonych prac ma być opracowanie ogólnego rozwiązania odwrotnego zadania kinematycznego dla robotów redundantnych pt. "Global Motion Planning For Redundant Industrial Robots".

Z punktu widzenia zleceniodawcy zewnętrznej umowa jest jednoetapowa. W planie pracy wyznaczono jedynie tzw. 'kamienie milowe' (milestones) dla zapewnienia koordynacji z jednostkami kooperującymi. Wewnętrzne zlecenie PIAP pt. "Odwrotne zadanie kinematyczne dla robotów redundantnych w kontekście projektu INGRID", obejmujące realizację tej umowy, podzielono na dwa etapy. Pierwszy dotyczy generalnego przygotowania się do rozwiązania problemu (przeгляд literatury, organizacja stanowiska badawczego od strony sprzętu i oprogramowania). W etapie drugim zostaną opracowane i przetestowane algorytmy wg wybranych metod, a następnie wykonane oprogramowanie będzie zintegrowane z systemem wykorzystywanym w projekcie INGRID. Niniejsze sprawozdanie przedstawia zakres prac wykonanych w pierwszym etapie.

2. Zadania zrealizowane w pierwszym etapie pracy.

W ramach prac pierwszego etapu zlecenia zrealizowano następujące zadania:

- 1) Uzgodnienie wymagań realizacji pracy - wymagania te precyzuje dokument pt. "PECO-INGRID: Requirements" zawarty w załączniku 1 do niniejszego sprawozdania.
- 2) Przegląd i analiza literatury światowej w tematyce kinematyki odwrotnej robotów redundantnych - w zadaniu tym wybrano i przejrano ponad 50 pozycji literaturowych, dla 25 z nich wykonano krótkie streszczenia - wyniki tej pracy zawiera raport zawarty w załączniku 2 do niniejszego sprawozdania. Dodatkowo dla koordynatora tematu INGRID (BNFL Anglia) i bezpośredniego współpracownika (CRIF Belgia) wykonano raport zawierający podsumowanie tej analizy, wraz z wyszczególnieniem proponowanych w literaturze metod, w języku angielskim. Raport ten jest dołączony do niniejszego sprawozdania jako załącznik 3.
- 3) Uruchomienie i wdrożenie do organizacji wymiany informacji w temacie INGRID końcówki poczty elektronicznej e_mail - z uwagi na tryb realizacji projektu szybka i niezawodna wymiana dużych ilości informacji pomiędzy PIAP a instytucjami współpracującymi jest niezbędna. Dotyczy to przede wszystkim CRIF. Tam właśnie jest stanowisko z zainstalowanym systemem ROBCAD (PIAP takiego stanowiska nie posiada) i oparty na nim system planowania trajektorii robota portalowego. Opracowane w PIAP algorytmy powinny być więc tam właśnie testowane. Z drugiej strony, z założenia praca jest realizowana głównie w Polsce. W ciągu 11 miesięcy trwania kontraktu przewidziano tylko cztery wyjazdy do CRIF i jeden do BNFL (final demo). Stąd powstał pomysł, dający realne szanse zakończenia tematu sukcesem, przesyłania opracowanego oprogramowania do CRIF i zwrótnie przesyłania do PIAP wyników testów. Jedyną drogą realizacji tej idei jest wykorzystanie poczty elektronicznej. Zakupiono odpowiedni modem, podpisano umowę z NASK (Naukowa i Akademicka Sieć Komputerowa) i od 15 lipca zespół dysponuje własną końcówką e_mail. Nasz adres: piap2@frodo.nask.org.pl. Komputer obsługujący pocztę w CRIF posiada tzw. konto gościnne, dzięki czemu możliwe jest przesyłanie dużych zbiorów informacji za pomocą programu FTP (File Transfer Protocol). Przetestowano także dołączanie do standardowych przesyłek zbiorów informacji kodowanych/rozkodowywanych przy pomocy komend uencode/udecode (UNIX). Zaznaczyć trzeba, że uruchomiony e_mail jest wykorzystywany także w drugim prowadzonym w PIAP-POS projekcie IMPACT-PECO oraz do innych bieżących tematów.
- 4) Zakup sprzętu komputerowego i oprogramowania - zdecydowano, że do zasadniczych prac symulacyjnych w PIAP będzie wykorzystywany posiadany w zespole POS zestaw typu IBM PC 486. Wobec konieczności wykonywania wielu prac w domu, jak też przenoszenia oprogramowania z innych ośrodków, niezbędnym dla sprawniej realizacji tematu okazało się posiadanie w zespole komputera przenośnego. Drugą ważną cechą prac w temacie INGRID jest opracowywanie, analiza i poprawianie wielu dokumentów tekstowych. Współpracujące instytucje od lat wykorzystują edytor Word for Windows. Dlatego też już na wstępie przedstawiono wymóg, aby prace PIAP bazowały również na tym edytorze. Z tego też powodu część środków zdecydowano przeznaczyć na modernizację posiadanych komputerów tak, aby można na nich pracować z Word for Windows. Za część pieniędzy zakupiono również sam edytor. Zakupiono także licencjonowaną wersję oprogramowania uruchomieniowego Borland C++ 4.0 - zgodnie z ustaleniami ma ona być wykorzystywana do prac software'owych na platformie sprzętowej PC. Aby wykorzystanie środków było bardziej

efektywne połączono je z drugim realizowanym w ramach współpracy w EWG tematem - IMPACT - PECO. Pełną listę zakupów sprzętu komputerowego i oprogramowania dokonanych w ramach obu tematów przedstawia załącznik 4 do niniejszego sprawozdania.

- 5) Opracowanie interfejsu ze środowiska oprogramowania Borland C++ do pakietu symulacyjnego ROBCAD. - jak już wspomniano stanowisko robocze z pakietem ROBCAD znajduje się w CRIF. Wstępne sprawdzanie metod rozwiązywania problemu kinematyki odwrotnej w PIAP będzie się odbywać poprzez symulacje na komputerze PC. Jako język programowania wybrano C++ w realizacji firmy Borland. Aby opracowane i oprogramowane w PIAP metody można było bez problemu implementować na stacji z systemem ROBCAD potrzeba dwóch rzeczy. Po pierwsze programy muszą być pisane zgodnie ze standardem ANSI C. Po drugie trzeba było opracować interfejs software'owy pomiędzy systemem Borland C++ i ROBCAD. Opis tego interfejsu zawarto w załączniku 2, do niniejszego sprawozdania, a listing przykładowego programu w załączniku 6.
- 6) Wykonanie oprogramowania rozwiązującego proste i odwrotne zadanie kinematyczne dla robota IRb-6 - wstępne sprawdzenie interfejsu z p.5) postanowiono wykonać na przykładzie znanego manipulatora robota IRb-6 o pięciu stopniach swobody. ROBCAD posiada taki manipulator w swojej bibliotece. W PIAP opracowano oprogramowanie realizujące rozwiązywanie prostego i odwrotnego zadania kinematycznego dla IRb-6. Jego listing zawarto w załączniku 5
- 7) Rozeznanie możliwości implementacji na komputerze PC systemu symulacji graficznej robota przemysłowego z możliwością wykorzystania własnej funkcji kinematyki odwrotnej - weryfikacja rozwiązania problemu kinematyki odwrotnej poprzez symulację komputerową jest zdecydowanie łatwiejsza i pewniejsza jeśli program symulacyjny ma możliwość graficznej prezentacji robota. Poszukując odpowiedniego dla PIAP rozwiązania rozeznano cztery możliwości:
 - Zakup oprogramowania ROBCAD - uzyskano ofertę od firmy Technomatix na dostawę takiego systemu. Przy uwzględnieniu przysługujących PIAP-owi zniżek opiewa ona na ok. 75 tys. DEM. Dodatkowo wymaga jako platformy sprzętowej stacji roboczej z szybką grafiką 3D - daje to min. dalsze 25-30 tys. DEM. Taka kwota przekracza cały budżet projektu INGRID, nie mówiąc o kwotach przeznaczonych na zakupy sprzętu i oprogramowania,
 - Zakup oprogramowania WORKSPACE 3.2 - za pośrednictwem CRIF uzyskaliśmy ofertę z firmy Robot Simulations Ltd. na kwotę ok. 6 tys. USD. Ten program może pracować na komputerze PC. Niestety przy bliższym rozeznaniu okazało się, że nie daje on możliwości implementacji własnych algorytmów rozwiązywania odrotnego problemu kinematycznego, co jest warunkiem koniecznym w projekcie - oferta na WORKSPACE 3.2 w załączniku 8.
 - Wykorzystanie ogólnodostępnego oprogramowania do wizualizacji i dołączenie go do własnych programów symulacyjnych - z pomocą CRIF znaleziono w grupie oprogramowania do swobodnego kopiowania (tzw. freeware) pakiet MotView (opis w załączniku 9). Będzie on dokładniej analizowany w dalszych pracach pod kątem możliwości wykorzystania w projekcie.
 - Opracowanie własnego programu wizualizacji na PC - wykonanie takiego oprogramowania jest możliwe lecz czas na to potrzebny nie pozwala brać realnie pod uwagę tej możliwości w pracach projektu INGRID-PECO.

3. Spis załączników:

- Załącznik 1. PECO-INGRID: Requirements. - wymagania realizacji pracy.
- Załącznik 2. Przegląd i analiza literatury światowej w tematyce kinematyki odwrotnej robotów redundantnych. Opracowanie interfejsu software'owego w środowisku Borland C++ do pakietu symulacyjnego ROBCAD. - raport z analizy literatury i prac software'owych nad interfejsem do pakietu ROBCAD.
- Załącznik 3. Inverse Kinematics for redundant manipulators. State of the art. - raport zawierający podsumowanie analizy literatury w języku angielskim
- Załącznik 4. Lista zakupów sprzętu komputerowego i oprogramowania w projekcie INGRID-PECO.
- Załącznik 5. Oprogramowanie rozwiązujące proste i odwrotne zadanie kinematyczne dla robota IRb-6 pięcioosiowego - listing.
- Załącznik 6. Interfejs z Borland C++ do ROBCAD - listing przykładowego programu.
- Załącznik 7. Quotation to PIAP for a ROBCAD Software System - oferta firmy Technomatix na dostawę do PIAP systemu ROBCAD.
- Załącznik 8. WORKSPACE 3.2 - oferta firmy Robot Simulations Ltd.
- Załącznik 9. MotView. A Visualiser of Motion in the Plane. - opis programu wizualizacji graficznej ruchu robota planarnego.

16.06.94



C.R.I.F.
SECTION : AUTOMATIQUE ET
INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

Av. F. Roosevelt, 50
BP 106 - Préfabr. 4
B - 1050 Bruxelles

Tél : 32-2-6503988
Fax : 32-2-6462569
T.V.A. 406.606.380

Centre de recherches scientifique
et technique de l'industrie des
fabrications métalliques

Etablissement reconnu par
application de l'arrêté-loi
du 30 janvier 1947

PECO - INGRID : Requirements

Introduction

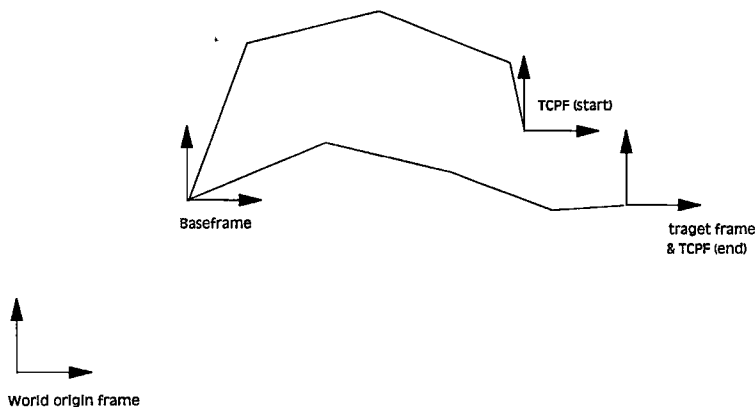
The goal of PIAP's contribution is to develop a C function achieving a *generalized kinematic inverse of robots*. The kinematic inverse of robot is the problem of finding the value of each joint so that when each joint is set to that value, the TCPF of the robot is superimpose on a given target location. Up to six degrees of freedom (DOFs), Robcad gives an automatic procedure giving this inverse. The goal of the PIAP's contribution is to find and program a method to get rid of this limitation so that an inverse can be found for kinematics such as the gantry+mast+robot used in the INGRID cell. Moreover, additional functionalities are to be added, usefull to the path planning support system (PPSS) of CRIF (e.g. the partial kinematic inverse).

Required functionalities

R1. Transformation from a given frame into a pose

The function should be able to return a least one pose satisfying the traditional meaning of the kinematic inverse, i.e. finding the pose of a given robot superimposing the TCPF of the robot onto a given target frame.

As the function should be able to deal with redundant robots, it has certainly more than one solution. The selection criteria should lead to select the pose the closest¹ in the configuration



space (CS) to the starting one.

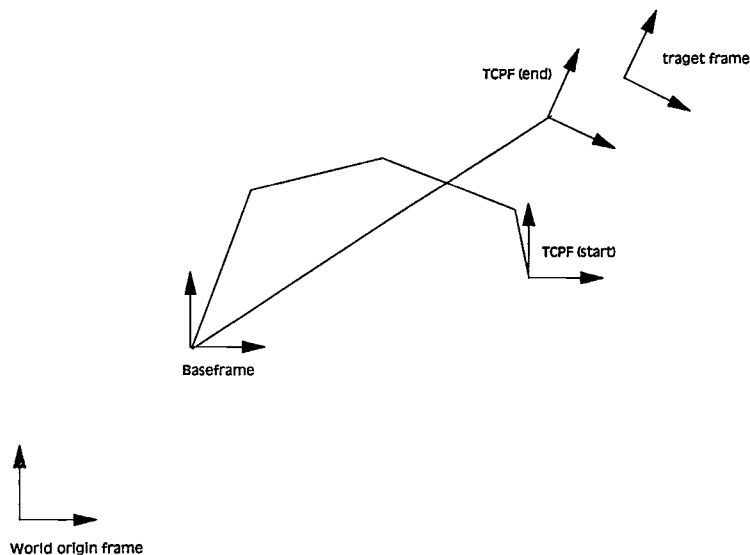
¹closest in CS means that the Manhattan distance between the two poses should be minimized
DETREQS.DOC - CRIF/WTCM - MAX - 16 June, 1994

7

R2. Level of superimposition options

One should be able to specify the level of superimposition for R2 as an argument of the function. The options should be (in the following order of importance):

- O1 inverse achieving the full frame superimposition : the TCPF of the robot should fully be superimposed on the given frame (position and orientation).
- O2 inverse achieving the partial superimposition: position superimposition + alignment of one of the axis.
- O3 inverse achieving only the position (x, y, z) superposition of the TCPF and the given frame.
- O4 inverse corresponding setting the TCPF the closest² to the given frame

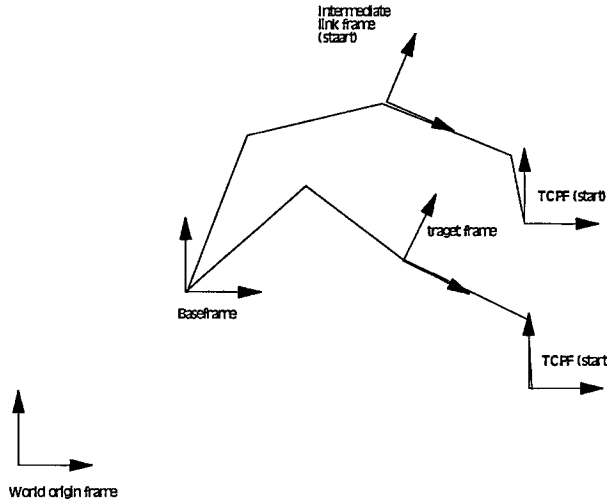


These options should be used as follows. For example, if the user wants to have a full superimposition, he will ask for option O1. If he requires to have the pose setting the TCPF the closest to the given frame, he will ask for O4. But in this case, if the inverse function finds a solution satisfying to more constrained criteria such as O1, O2 or O3, this inverse will of course be considered as a solution. O4 is especially meant to be useful when the operator sets the target frame outside the workspace of the robot.

R3. Intermediate link kinematic inverse option

The function should be able to apply R2 to a partial kinematic tree of the given robot. This means that the inverse function should be able to find the pose that superimposes a frame associated to a given intermediate link (passed as an argument to the function) of the given robot onto a given frame. The remaining of the kinematic tree should be computed according to the options and computing criteria (e.g. collision free or not, closest to the starting pose or not,...).

²closest means here 1°) the minimization of the Euclidean in (x, y, z) 2°) the minimization of the Manhattan distance in the orientations.



R4. Collision-free option

- One should be able to specify by an argument passed to the function if the pose found by the inverse should correspond to a collision-free pose or not.

R5. Computing time optimization

The inverse function should keep its computing time very low so that it keeps a certain level of comfort when used in interactive methods such as the carrot guiding method. Therefore, the method(s) should be optimized for each option.

R6. Programming

All the programming will be done in ANSI C language for portability. Programming guidelines are given in annex. It is wished that they are applied but this is not mandatory. All the comments put in the source file should be in English.

R7. Interface to Robcad

- The inverse function will be integrated within a Robcad application (CRIF's PPSS). It is therefore required that the C functions declaration and the data types respect the Robcad's specifications. It is proposed to proceed as follow:

- Inputs: all the information required by method should be obtained through functions simulating the acces to the Robcad database (e.g. baseframe of the robot, DH parameters).
- Outputs: all the outputs of the function should respect the Robcad types.

All these functions simulating the Robcad's functions should be placed in a separate module (file) achieving a simulation of the real Robcad library that can be easily replaced.

Example:

```
Module 1:                                void function1()
...                                       /* function calling a Robcad function
#include "atypes.h"                       */
...                                       {
```

```

...
tPose pose;
...

...
if (!apSetProperty(robot_id, P_POSE,
pose))
{
printf("Error in apSetProperty\n");
}
...
}

Module Robcad simulation:

...
#include "atypes.h"
...
/* PIAP own robot robot description
variables */
tPose PIAP_robot_pose; /* for example
*/

tBool apSetProperty(tID robot_id,
tProp property, tPose pose)

/* function setting a property to a
robot. Translates the Robcad pose to
PIAP own description and variable*/

{
...
memcpy(PIAP_robot_pose, pose,
sizeof(tPose));
...
}

...

```

Annexes:

1. Excerpts from Robcad manuals:

- a selected list of Robapi objects: describes the structure and the associated properties of the objects of the Robcad database related to this application. The most important are device, robot and workpoint.
- a selected list of Rose functions: the most important ones are apGetProperty, apSetProperty and apWhichInCollision.
- the description of the DH_PARAMS property of the object device.
- the list of definition of Robcad terms

2. A diskette containing include files and C source files from an example of ROSE application (see ROBCAD directory).

The content of the diskette is listed hereafter.

```

Volume in drive A has no label
Volume Serial Number is 10FB-2A3B

```

Directory of A:\

```

ROBCAD      <DIR>      06-14-94   6:01p
DIR        TXT          0 06-16-94   2:45p
ENV_MOD    <DIR>      06-14-94   6:00p
          3 file(s)          0 bytes

```

Directory of A:\ENV_MOD

```

.          <DIR>      06-14-94   6:00p
..         <DIR>      06-14-94   6:00p

```

```
GRIDMGR C      29582 06-14-94  8:35a
OCCUPAN C      1264 06-14-94  8:35a
POS_MGR C     31087 06-14-94  8:35a
US_INTEG C    46708 06-14-94  8:35a
ENVFUS  H      2342 06-14-94  8:35a
STRUCTS  H     10217 06-14-94  8:35a
USMOD    INC   14564 06-14-94  8:35a
      9 file(s)      135764 bytes
```

Directory of A:\ROBCAD

```
.          <DIR>      06-14-94  6:01p
..         <DIR>      06-14-94  6:01p
APROBDEF  H      5389 06-14-94  4:57p
APTYPES   H     21046 06-14-94  4:56p
APPUBLIC  H     20392 06-14-94  4:56p
TEACH     C      1688 06-16-94  1:45p
REACH     C      3777 06-16-94  1:45p
INVERSE   C      6295 06-16-94  1:44p
      8 file(s)      58587 bytes
```

Total files listed:

```
      20 file(s)      194351 bytes
      1257472 bytes free
```

3. Programming guidelines

AA