

AZ SML MODULNYELVE

Modulok az SML-ben

- A modul: (1) *fordítási egység*, (2) a *csoportosítás* és az *elrejtés*, azaz az *absztrakció* eszköze.
- Szignatúra (*signature*): specifikációs modul; a struktúra *specifikációja*, „*típusa*”.
- Struktúra (*structure*): implementációs modul; a szignatúra *megvalósítása*.
- Funktor (*functor*): *struktúrával* paraméterezhető (generikus) modul; eredménye egy *struktúra*.
- Egy struktúra akkor és csak akkor valósít meg egy szignatúrát, ha a struktúra kielégíti a szignatúra által támasztott összes követelményt (később pontosítjuk).
- Modul-elnevezések az MOSML-ben (ld. *Moscow ML Language Overview*):
 - modul (*module*): a struktúra és a funktor *közös* megnevezése;
 - (fordítási, ill. lefordított) *egység* (*compilation*, ill. *compiled unit*): egy struktúra vagy szignatúra lefordítható, ill. lefordított (tárgykódú) változata.
- Állománynév-kiterjesztések az MOSML-ben
 - `.sml` (SML, opcionális): struktúra vagy funktor,
 - `.sig` (SML, kötelező): szignatúra,
 - `.ui` (MOSML, kötelező): szignatúra lefordított változata (unit interface code),
 - `.uo` (MOSML, kötelező): struktúra lefordított változata (unit object code).

Szignatúra és struktúra

A szignatúra alapváltozata

`sig specs end` alakú *szignatúrakifejezés*,

ahol a *specs* specifikációsorozat az alábbi elemeket tartalmazhatja:

- típusspecifikáció `type (tyvar1, ..., tyvarn) tycon [= typ]` alakban, ahol *typ* opcionális;
- adattípus-specifikáció (a `datatype`-deklarációval azonos alakban);
- kivételspecifikáció `exception excon of typ` alakban;
- értékspecifikáció `val id : typ` alakban.

A struktúra alapváltozata

`struct decs end` alakú *struktúrakifejezés*,

ahol a *decs* deklarációsorozat az alábbi elemeket tartalmazhatja:

- típuskonstruktort létrehozó típusdeklaráció;
- új (felhasználói) adattípust létrehozó adattípus-deklaráció (`datatype`-deklaráció);
- kivételkonstruktort (állandót vagy függvényt) létrehozó kivételdeklaráció;
- megadott típusú új nevet (névkonstruktort) létrehozó értékdeklaráció.

SZIGNATÚRA ÉS STRUKTÚRA

Szigatúra és struktúra (folyt.)

A szigatúra-deklaráció

- signature *sigid* = *sigexp* alakú, ahol
 - *sigid* egy szigatúranév,
 - *sigexp* pedig egy szigatúrakifejezés.
- A szigatúranév a szigatúrakifejezés rövidítése, szinonimája.

A struktúra-deklaráció egyszerű változata

- structure *strid* = *strexp* alakú, ahol
 - *strid* egy struktúranév,
 - *strexp* pedig egy struktúrakifejezés.
- A struktúranév a struktúrakifejezés rövidítése, szinonimája.

A struktúra-deklaráció bonyolultabb változata

- a struktúra *szigatúrához kötése*, amely kétféle lehet:
 - áttetsző (opál, opaque): structure *strid* := *sigid* = *strexp*
 - átlátszó (transparens, transparent): structure *strid* : *sigid* = *strexp*

Példa: a TCsiga struktúra és törzsszigatúrája

- A TCsiga struktúra (a típusleíró modul) és törzsszigatúrája

```

structure TCsiga =
struct
  type meret      = int
  type ciklus    = int
  type sorszam   = int
  type oszlopszam = int
  type ertek     = int
  type adottElem =
    sorszam * oszlopszam * ertek

  type feladvanyleiro =
    meret * ciklus * adottElem list

  type ertekVagyUres = int
  type sor          =
    ertekVagyUres list

  type csigatabla =
    sor list
end
(* TCsiga.sml
   törzsszigatúrája *)
type meret      = int
type ciklus    = int
type sorszam   = int
type oszlopszam = int
type ertek     = int
type adottElem =
  int * int * int

type feladvanyleiro =
  int * int * (int * int * int) list

type ertekVagyUres = int
type sor          =
  int list

type csigatabla =
  int list list

```

Példa: a KCsiga és a Csiga szigatúra

- A KCsiga struktúra (a keretprogram) szigatúrája

```

signature KCsiga =
sig
  val csigaBe : string -> TCsiga.feladvanyleiro
  val csigaKi : string * TCsiga.csigatabla list -> unit
  val megold : string * string -> string
end

```

- A Csiga struktúra (a főmodul) szigatúrája

```

signature Csiga =
sig
  val buvosCsiga :
    TCsiga.feladvanyleiro -> TCsiga.csigatabla list
end

```

Mindkét szigatúra csupán val *id* : *typ* alakú *értékspecifikációkat* tartalmaz.

Példa: a TCsiga struktúra és törzsszigatúrája (folyt.)

- *Törzsszigatúra* (principal signature): egy struktúra összetevőinek *lehető leghspecifikusabb* leírása.
- TCsiga csupa típuspecifikációt tartalmaz


```

type (tyvar1, ..., tyvarn) tycon [ = typ ],
      pontosabban
type tycon = typ
      alakban.

```
- Egy struktúra szigatúra-megkötés nélkül nem rejti el a részleteket, azaz *gyenge absztrakciót* valósít meg.

Példa: változatok a TCsiga struktúrára és szigatúrára

• Struktúra átlátszó szigatúrával

```
structure TCsiga : TCsiga =
struct
  type meret          = int
  ...
  type adottElem     =
    sorszam * oszlopszam * ertek
  type feladvanyleiro =
    meret * ciklus * adottElem list
  type ertekVagyUres = int
  type sor           =
    ertekVagyUres list
  type csigatabla   = sor list
end
```

• Struktúra áttetsző szigatúrával

```
structure TCsiga :> TCsiga =
struct
  type meret          = int
  ...
  type adottElem     =
    sorszam * oszlopszam * ertek
  type feladvanyleiro =
    meret * ciklus * adottElem list
  type ertekVagyUres = int
  type sor           =
    ertekVagyUres list
  type csigatabla   = sor list
end
```

• Szigatúra (a részleteket *elrejtő*) absztrakt adattípus megvalósításához

```
signature TCsiga =
sig
  type feladvanyleiro
  type csigatabla
end
```

Példa: sort megvalósító szigatúra és struktúra (folyt.)

• Struktúra áttetsző szigatúrával

```
structure Queue_as_lists :> QUEUE =
struct type 'a queue = 'a list * 'a list
  exception Empty
  val empty = (nil, nil)
  fun insert (x, (bs, fs)) = (x::bs, fs)
  fun remove (nil, nil) = raise Empty
    | remove (bs, nil) = remove (nil, rev bs)
    | remove (bs, f::fs) = (f, (bs, fs))
end
```

• Struktúra átlátszó szigatúrával

```
structure Queue_as_lists : QUEUE =
struct type 'a queue = 'a list * 'a list
  exception Empty
  val empty = (nil, nil)
  fun insert (x, (bs, fs)) = (x::bs, fs)
  fun remove (nil, nil) = raise Empty
    | remove (bs, nil) = remove (nil, rev bs)
    | remove (bs, f::fs) = (f, (bs, fs))
end
```

Példa: sort megvalósító szigatúra és struktúra

```
signature QUEUE =
sig
  type 'a queue
  exception Empty
  val empty : 'a queue
  val insert : 'a * 'a queue -> 'a queue
  val remove : 'a queue -> 'a * 'a queue
end
      típusspecifikáció
      kivételspecifikáció
      értékspecifikáció
      Minden típus és érték polimorf!

structure Queue_as_lists =
struct
  type 'a queue = 'a list * 'a list
  exception Empty
  val empty = (nil, nil)
  fun insert (x, (bs, fs)) = (x::bs, fs)
  fun remove (nil, nil) = raise Empty
    | remove (bs, nil) = remove (nil, rev bs)
    | remove (bs, f::fs) = (f, (bs, fs))
end
      típuskonstruktor deklarálása
      kivételkonstruktor deklarálása
      névkonstruktorok deklarálása
```

Példa: sort megvalósító szigatúra és struktúra (folyt.)

• Struktúra bővített áttetsző szigatúrával

```
structure Queue_as_lists :>
  QUEUE where type 'a queue = 'a list * 'a list =
struct type 'a queue = 'a list * 'a list
  exception Empty
  val empty = (nil, nil)
  fun insert (x, (bs, fs)) = (x::bs, fs)
  fun remove (nil, nil) = raise Empty
    | remove (bs, nil) = remove (nil, rev bs)
    | remove (bs, f::fs) = (f, (bs, fs))
end
```

- Áttetsző szigatúra-kötésnél a típusok megvalósítása rejtve marad, vagyis a *látható szigatúra független* a struktúra megvalósításától (pl. `type 'a queue = 'a queue`);
- átlátszó szigatúra-kötésnél a típusok megvalósítása láthatóvá válik, vagyis a *látható szigatúra függ* a struktúra megvalósításától (pl. `type 'a queue = 'a list * 'a list`).
- A megvalósítástól független modulrendszer kialakításához áttetsző szigatúra-kötést kell alkalmazni. Ezt garantálja az `mosmlc` fordító *structure*-módban.

Példa: sort megvalósító szigatúra és struktúra (folyt.)

- Szigatúra-öröklődés specializációval, 1. változat

```
signature QUEUE_AS_LISTS =
  QUEUE where type 'a queue = 'a list * 'a list
```

- Szigatúra-öröklődés specializációval, 2. változat (ekvivalens az 1. változattal)

```
signature QUEUE_AS_LISTS =
sig
  include QUEUE
end where type 'a queue = 'a list * 'a list
```

- Struktúra áttetsző szigatúrával

```
structure Queue_as_lists :> QUEUE_AS_LISTS =
struct
  type 'a queue = 'a list * 'a list
  exception Empty
  val empty = (nil, nil)
  fun insert (x, (bs, fs)) = (x::bs, fs)
  fun remove (nil, nil) = raise Empty
    | remove (bs, nil) = remove (nil, rev bs)
    | remove (bs, f::fs) = (f, (bs, fs))
end
```

Példa: sort megvalósító szigatúra és struktúra (folyt.)

- Struktúra-öröklődés

```
structure Queue_as_listsWithEmpty :> QUEUE_AS_LISTS_WITH_EMPTY =
struct
  structure Q = Queue_as_lists
  open Q
  fun is_empty (nil, nil) = true | is_empty _ = false
end
```

- Struktúra-öröklődés, ekvivalens az előzővel

```
structure Queue_as_listsWithEmpty :> QUEUE_AS_LISTS_WITH_EMPTY =
struct
  structure Q : QUEUE_AS_LISTS = Queue_as_lists
  open Q
  fun is_empty (nil, nil) = true | is_empty _ = false
end
```

- Struktúra-öröklődés, ekvivalens az előzővel

```
structure Queue_as_listsWithEmpty :> QUEUE_AS_LISTS_WITH_EMPTY =
struct
  structure Q = Queue_as_lists : QUEUE_AS_LISTS
  open Q
  fun is_empty (nil, nil) = true | is_empty _ = false
end
```

Példa: sort megvalósító szigatúra és struktúra (folyt.)

- Szigatúra-öröklődés inklúzióval (és az eredeti szigatúra bővítésével)

```
signature QUEUE_AS_LISTS_WITH_EMPTY =
sig
  include QUEUE
  val is_empty : 'a queue -> bool
end where type 'a queue = 'a list * 'a list
```

- Struktúra-öröklődés (hibás: type 'a queue = 'a list * 'a list nincs specifikálva QUEUE-ban, ezért hiába van deklarálva Queue_as_lists-ben)

```
structure Queue_as_listsWithEmpty :> QUEUE_AS_LISTS_WITH_EMPTY =
struct
  structure Q = Queue_as_lists :
    QUEUE where type 'a queue = 'a list * 'a list
end
```

- Struktúra-öröklődés (hibás: val 'a is_empty : 'a list * 'a list -> bool nincs deklarálva Queue_as_lists-ben)

```
structure Queue_as_listsWithEmpty :> QUEUE_AS_LISTS_WITH_EMPTY =
struct
  structure Q = Queue_as_lists
  open Q
end
```

SZIGNATÚRA-ILLESZKEDÉS

Szignatúra-illeszkedés

- Mikor tekinthető egy struktúra egy szignatúra megvalósításának?
Akkor, ha a struktúra az összes olyan komponenszt definiálja és az összes olyan típusdefiniációt kielégíti, amelyeket a szignatúra elvár. Másszóval definiálja a szignatúrában megadottal
 - ekvivalens típusú kivételkomponenseket,
 - kompatibilis (azaz legalább annyira általános) típusú értékkomponenseket,
 - azonos arítású (paraméterszámú) és – ha definiálja – ekvivalens definíciójú típuskomponenseket.
- Csakhogy egy struktúra a szignatúrájához képest, többek között
 - több komponenszt definiálhat;
 - általánosabb típusú értékeket definiálhat (ami az újrafelhasználást segíti elő);
 - datatype-deklarációt használhat type-deklaráció helyett, értékkonstruktort definiálhat érték helyett (ami az adatabsztrakciót teszi lehetővé);
 - a deklarációk sorrendje tetszőleges lehet (ami növeli a flexibilitást).
- A feltett kérdésre ezért pontosabb a következő válasz:
Egy struktúra akkor és csak akkor tekinthető egy szignatúra megvalósításának, ha a struktúra ún. törzsszignatúrája illeszkedik az adott szignatúrára.

Szignatúra-illeszkedés (folyt.)

- Egy szignatúra-jelölt (candidate signature) akkor és csak akkor illeszkedik egy célszignatúrára (target signature), ha az összes olyan komponenszt és típusdefiniációt tartalmazza, amelyet a célszignatúra specifikál.
- Pontosabban, a szignatúra-jelöltnek tartalmaznia kell a célszignatúra
 - összes típuskonstruktorát, mégpedig azonos arítással (paraméterszámmal) és – ha definiálja – ekvivalens definícióval;
 - összes datatype-deklarációját, mégpedig úgy, hogy az adatkonstruktoroknak ekvivalens típusúaknak kell lenniük;
 - összes exception deklarációját, mégpedig úgy, hogy az argumentumaiknak, ha vannak, ekvivalens típusúaknak kell lenniük;
 - minden értékdeklarációját, mégpedig úgy, hogy a típusuknak legalább annyira általánosnak kell lenniük, mint a célszignatúrában.
- A szignatúra-jelöltnek a célszignatúránál lehet több komponense, és több típusdefiniációt tartalmazhat, de nem lehet benne kevesebb egyikből sem.
- A szignatúra-jelölt a célszignatúra gyengítése, mivel a célszignatúra összes tulajdonsága igaz a szignatúra-jelöltre is.

Törzstípus, törzsszignatúra

- Egy érték törzstípusa (principal type) az adott értékhez rendelhető legáltalánosabb típus.
- Minden jóldefiniált értéknek van törzstípusa.
Pl. ha $\text{fun } I \ x = x$, akkor $I : 'a \rightarrow 'a$.
- Egy struktúra törzsszignatúrája (principal signature) a komponenseihez rendelhető legspecifikusabb leírás.
- Minden jóldefiniált struktúrának van törzsszignatúrája.
- A típusellenőrzéshez elegendő a törzsszignatúra ismerete, a struktúrát magát nem kell vizsgálni.
- Egy struktúra törzsszignatúrája a következőképpen állítható elő: ha a deklaráció
 - $\text{type } (tyvar_1, \dots, tyvar_n) \text{ tycon} = \text{typ}$ alakú, akkor a törzsszignatúra az ezzel azonos specifikációt tartalmazza;
 - $\text{datatype } (tyvar_1, \dots, tyvar_n) \text{ tycon} = \text{con}_1 \text{ of } \text{typ}_1 \mid \dots \mid \text{con}_k \text{ of } \text{typ}_k$ alakú, akkor a törzsszignatúra az ezzel azonos specifikációt tartalmazza;
 - $\text{exception } id \text{ of } \text{typ}$ alakú, akkor a törzsszignatúra az ezzel azonos specifikációt tartalmazza;
 - $\text{val } id = \text{exp}$ alakú, akkor a törzsszignatúra a $\text{val } id : \text{typ}$ specifikációt tartalmazza, ahol typ az exp kifejezés törzstípusa.

Szignatúra-illeszkedés: QUEUE, QUEUE_WITH_EMPTY, QUEUE_AS_LISTS

- ```
signature QUEUE =
sig type 'a queue
 exception Empty
 val empty : 'a queue
 val insert : 'a * 'a queue -> 'a queue
 val remove : 'a queue -> 'a * 'a queue
end

signature QUEUE_WITH_EMPTY =
sig include QUEUE
 val is_empty : 'a queue -> bool
end

signature QUEUE_AS_LISTS =
 QUEUE where type 'a queue = 'a list * 'a list
```
- QUEUE\_WITH\_EMPTY illeszkedik QUEUE-ra, mert kielégíti QUEUE összes elvárását. QUEUE azonban a hiányzó is\_empty miatt nem illeszkedik QUEUE\_WITH\_EMPTY-re.
- QUEUE\_AS\_LISTS illeszkedik QUEUE-ra, csak abban különbözik tőle, hogy 'a queue-t specifikálja.  
QUEUE azonban nem illeszkedik QUEUE\_AS\_LISTS-re, mert a QUEUE-beli 'a queue nem ekvivalens 'a list \* 'a list-tel.

## Szigatúra-illeszkedés: QUEUE, QUEUE\_AS\_LIST

```

signature QUEUE =
sig type 'a queue
 exception Empty
 val empty : 'a queue
 val insert : 'a * 'a queue -> 'a queue
 val remove : 'a queue -> 'a * 'a queue
end

signature QUEUE_AS_LIST =
sig type 'a queue = 'a list
 exception Empty
 val empty : 'a list
 val insert : 'a * 'a list -> 'a list
 val remove : 'a list -> 'a * 'a list
end

```

- Úgy vélhetjük, hogy QUEUE\_AS\_LIST nem illeszkedik QUEUE-ra, annyira különbözik tőle.
- Csakhogy az előzővel ekvivalens az alábbi definíció:

```
signature QUEUE_AS_LIST =
 QUEUE where type 'a queue = 'a list
```

és az utóbbi nyilvánvalóan illeszkedik QUEUE-ra.

## Szigatúra-illeszkedés: RBT\_DT, RBT

```

signature RBT_DT =
sig datatype 'a rbt = Empty
 | Red of 'a rbt * 'a * 'a rbt
 | Black of 'a rbt * 'a * 'a rbt
end

signature RBT =
sig type 'a rbt
 val Empty : 'a rbt
 val Red : 'a rbt * 'a * 'a rbt -> 'a rbt
end

```

- Az RBT\_DT szigatúra-jelölt illeszkedik az RBT célszigatúrára, mert az RBT\_DT-ben a datatype deklarációval specifikált típus és adatkonstruktorai illeszkednek az RBT-ben specifikált 'a rbt absztrakt típusra és a két értékspecifikációra (Empty és Red). Fordítva nem igaz.
- RBT\_DT ugyanis a következő típust, ill. adatkonstruktorokat specifikálja:

```

type 'a rbt
con 'a Empty : 'a rbt
con 'a Red : 'a rbt * 'a * 'a rbt -> 'a rbt
con 'a Black : 'a rbt * 'a * 'a rbt -> 'a rbt

```

## Szigatúra-illeszkedés: MERGEABLE\_QUEUE, MERGEABLE\_INT\_QUEUE

- Említettük, hogy a szigatúra-jelöltben az értékek típusa általánosabb lehet, mint a célszigatúrában.
- A szigatúra-illeszkedés együtt járhat azzal, hogy a polimorf típusokat konkrét típusokra cseréljük.
- signature MERGEABLE\_QUEUE =

```

sig
 include QUEUE
 val merge : 'a queue * 'a queue -> 'a queue
end

signature MERGEABLE_INT_QUEUE =
sig
 include QUEUE
 val merge : int queue * int queue -> int queue
end

```
- A MERGEABLE\_QUEUE szigatúra-jelölt illeszkedik a MERGEABLE\_INT\_QUEUE célszigatúrára, mert az előbbiben specifikált polimorf merge függvény típusát leíró típuskifejezés típusváltozója leköthető az int típusal. Fordítva nem igaz.

## Szigatúra-illeszkedés (folyt.)

- Összefoglalásként most már még pontosabban válaszolhatunk a kérdésre: Mikor tekinthető egy *struktúra-jelölt* egy *célszigatúra* megvalósításának?
- Akkor és csak akkor, ha a struktúra-jelölt *törzsszigatúrája* illeszkedik a célszigatúrára.
- Nyilvánvaló, hogy minden struktúra kielégíti a törzsszigatúráját (ui. az illeszkedési reláció reflexív).
- Bármely szigatúra, amelyet egy struktúra képes megvalósítani, nem lehet *gyengébb* az adott struktúra törzsszigatúrájánál.
- A törzsszigatúra a *leggyengébb* szigatúra, amelyet egy struktúra megvalósíthat.

## SZIGNATÚRA-KÖTÉS

### Struktúra-deklaráció szigatúra-kötéssel

- Már láttuk a kétféle szigatúra-kötés használatát struktúra-deklarációkban:
  - átlátszó: `structure strid : sigexp = stexp`
  - áttetsző: `structure strid :> sigexp = stexp`
- A típusellenőrzés lépései szigatúrához kötött struktúra-deklaráció esetén a következők:
  - `stexp` megvalósítja-e `sigexp`-et? Ennek eldöntéséhez a fordító
    - meghatározza `stexp sigexp0` törzsszigatúráját, és megpróbálja illeszteni a `sigexp` célszigatúrára; valamint
    - előállítja a bővített `sigexp`' szigatúrát úgy, hogy `sigexp`-et bővíti a `sigexp0`-ban lévő típusdeklarációkkal;
  - a struktúranévhez köti a szigatúrát a kötés előírt módja szerint: a struktúra látható szigatúrája
    - átlátszó szigatúra-kötés esetén `sigexp`,
    - áttetsző szigatúra-kötés esetén `sigexp` lesz.

### Szigatúra-kötés

- *Szigatúra-kötéssel* (signature ascription) írjuk elő, hogy egy struktúra valósítson meg egy szigatúrát.
- A szigatúra-kötés *erősíti* a struktúra szigatúráját az összes további felhasználás számára.
- Kétféle szigatúra-kötés van az SML-ben:
  - átlátszó vagy *leíró* (transparent, *descriptive*): a struktúra *látható szigatúrája* az adott struktúrában definiált típusokkal *bővített* célszigatúra lesz,
  - áttetsző vagy *korlátozó* (opaque, *restrictive*): a struktúra *látható szigatúrája* a célszigatúra lesz, bővítés nélkül.
- A szigatúra-kötés mindkét változata *elrejt* azokat a komponenseket, amelyek a célszigatúra nem specifikál.
- A moduláris programozás biztonsága megköveteli a típusinformációk gondos kezelését. A láthatóvá tételnek és az elrejtésnek egyformán fontos a szerepe.
- Az áttetsző szigatúra-kötéssel a típusinformáció láthatóságát korlátozzuk.
- Az átlátszó szigatúra-kötéssel a típusinformációt láthatóvá tesszük.

### Struktúra-deklaráció szigatúra-kötéssel (folyt.)

- A szigatúrához kötött struktúra-deklaráció kiértékelését a fordító így folytatja:
  - kiértékeli `stexp`-et;
  - előállítja az eredményül kapott érték egy *nézetét* úgy, hogy eldobja azokat az értékeket, amelyeket a `sigexp` célszigatúra nem tartalmaz;
  - a `strid` nevet ehhez a nézethez köti.
- A leírtakból is kiténik, hogy az átlátszó szigatúra-kötés az áttetsző szigatúra-kötés *speciális esete*: a bővített szigatúrát a programozó maga is előállíthatná (technikai nehézségektől eltekintve, ui. néha nem férhet hozzá a szükséges információhoz).
- Az *áttetsző szigatúra-kötés* legfontosabb célja az adatabstrakció elősegítése. Tekintsük a példát a következő dián!
- Az áttetsző szigatúra-kötés garantálja 'a `Queue_as_lists.queue` *absztrakt* voltát, így *kizárólag* az `empty`, `insert` és `remove` műveleteket lehet alkalmazni ilyen típusú értékekre.
- A programozó *nem használhatja ki*, hogy most a 'a `Queue_as_lists.queue` típus listákból álló párral valósítjuk meg.
- Ezért a szigatúrát megvalósító struktúra szabadon, a többi programrész konzisztenciájának megsértése nélkül módosítható.

## Struktúra-deklaráció áttetsző szigatúra-kötéssel: QUEUE, Queue\_as\_lists

- Az elmondottak illusztrálására nézzük a már látott példát:

```
signature QUEUE =
sig
 type 'a queue
 exception Empty
 val empty : 'a queue
 val insert : 'a * 'a queue -> 'a queue
 val remove : 'a queue -> 'a * 'a queue
end

structure Queue_as_lists :> QUEUE =
struct
 type 'a queue = 'a list * 'a list
 exception Empty
 val empty = (nil, nil)
 fun insert (x, (bs, fs)) = (x::bs, fs)
 fun remove (nil, nil) = raise Empty
 | remove (bs, nil) = remove (nil, rev bs)
 | remove (bs, f::fs) = (f, (bs, fs))
end
```

## Struktúra-deklaráció áttetsző szigatúra-kötéssel: prioritási sor

Lássuk a következő példát!

- Olyan absztrakt prioritásisor-típust akarunk létrehozni, amely tetszőleges típusú elemekből állhat.
- A műveletek (függvények) nem lehetnek politípusúak, mert az elemek relatív prioritását összehasonlítással tudjuk megállapítani. Ezt a függőséget fejezi ki az alábbi szigatúra:

```
signature PQ =
sig
 type elt
 val lt : elt * elt -> bool
 type queue
 exception Empty
 val empty : queue
 val insert : elt * queue -> queue
 val remove : queue -> elt * queue
end
```

- Egy lehetséges megvalósítás vázlatát mutatja a következő példa, ahol az elemek string típusúak.

## Struktúra-deklaráció áttetsző szigatúra-kötéssel (folyt.)

- A típusinformáció elrejtése a reprezentáció (ábrázolás) invariánsait is elszigeteli az absztrakció megvalósításától.
  - Az 'a Queue\_as\_lists.queue típust egy olyan absztrakt gép állapotfűpusának tekinthetjük, amelynek csak három parancs adható: empty (amely a kezdőállapotot hozza létre), insert és remove.
  - A Queue\_as\_lists struktúrán belül invariáns állításokkal jellemezhetjük az absztrakt gép belső állapotát.
  - Az adatabsztrakció elegáns eljárást nyújt az invariáns állítások alkalmazásához; az *assume-ensure* vagy *rely-guarantee* néven ismert eljáráshoz két követelményt kell kielégíteni:
    - minden inicializáló parancsnak *garantálnia kell* az invariáns teljesülését a végrehajtása után;
    - minden állapotmódosító parancs *felteheti*, hogy az invariáns teljesül a parancs végrehajtásának kezdetén, és minden ilyen parancsnak *garantálnia kell* az invariáns teljesülését a végrehajtása után.
  - Teljes indukcióval belátható, hogy az invariáns állítás az összes állapotra teljesül, azaz valóban invariáns!

## Struktúra-deklaráció áttetsző szigatúra-kötéssel: prioritási sor (folyt.)

- A megvalósítástól független absztrakt típus *áttetsző szigatúráját* igényel:

```
structure PrioQueue :> PQ =
struct
 type elt = string
 val lt : string * string -> bool = (op <)
 type queue = ...
end
```

- Csakhogy így PrioQueue.queue mellett PrioQueue.elt is absztrakt típus lett, így nem tudunk PrioQueue.elt típusú értéket létrehozni, és pl. nem hívhatjuk a PrioQueue.insert függvényt. Ezért PrioQueue.elt-nek nem kellene absztrakt típusnak lennie.
- Egy lehetséges megoldás az, hogy a PQ szigatúráját bővítjük, és a bővített szigatúráját kötjük a struktúrához:

```
signature STRING_PQ = PQ where type elt = string
structure PrioQueue :> STRING_PQ = ...
```

vagy

```
structure PrioQueue :> PQ where type elt = string = ...
```

- A tanulság: megfontolást igényel, hogy mely típusokat válasszuk absztraktnak, és melyeket ne.



## Struktúra-deklaráció átlátszó szigatúra-kötéssel: ORDERED, MyString

- Átlátszó szigatúra-kötéssel csökkenthető az explicit típusspecifikációk száma a szigatúrában. De az se jó, ha túl sokat használjuk, ui. a típusinformációk láthatóvá tételével csökken a modulok függetlensége.
- Az átlátszó szigatúra-kötés tipikusan arra való, hogy egy struktúra *nézetét* állítsuk elő vele. E nézet célja, hogy elrejtse azokat a komponenseket, amelyek az adott szöveggörnyezetben feleslegesek, de ne rejtse el azokat a típusdefiniókat, amelyekre szükség van.
- Az ORDERED szigatúra specifikálja a `t` típust és a `t` típusú értékekből álló párokra alkalmazható `lt` összehasonlító műveletet.

```
signature ORDERED =
sig
 type t
 val lt : t * t -> bool
end
```

- Az ilyen szigatúrát, mint láttuk, *csak átlátszóan* érdemes egy struktúrához kötni, különben nem tudnánk `t` típusú értékeket létrehozni.

## Struktúra-deklaráció átlátszó szigatúra-kötéssel: ORDERED, IntLt, IntDiv

- Tegyük föl, hogy egészeket kétféle alapon akarunk összehasonlítani, de nem akarjuk elrejtteni, hogy egészekekről van szó:
- Összehasonlítás aritmetikai alapon

```
structure IntLt : ORDERED =
struct
 type t = int
 val lt = (op <)
end
```

- Összehasonlítás oszthatóság alapján

```
structure IntDiv : ORDERED =
struct
 type t = int
 fun lt (m, n) = (n mod m = 0)
end
```

- Mind `IntLt.t`, mind `IntDiv.t` ekvivalens `int`-tel.

## Struktúra-deklaráció átlátszó szigatúra-kötéssel: ORDERED, MyString (folyt.)

- Nézzük a következő példát:

```
structure MyString : ORDERED =
struct
 type t = string
 val clt = Char.<
 fun lt (s, t) = ... clt ...
end
```

- `MyString` a füzerek összehasonlítását karakterek összehasonlítására vezeti vissza, `clt`-t elrejt. `String.t` a külvilág számára is ekvivalens `string`-gel, bár ez az ORDERED szigatúrából nem látszik: `MyString` tényleges, *látható* szigatúrája ugyanis:

```
ORDERED where type t = string
```

- Arra is érdemes átlátszó szigatúra-kötést használni, hogy *dokumentáljuk* egy típus jelentését (anélkül, hogy absztrakttá tennénk).

## Átlátszóság, áttetszőség, függőség

- Az átlátszó szigatúra-kötés a típuslevezetéshez hasonlóan megkönnyíti a programozó dolgát: kevesebbet kell írnia. *De ára van:*
- átlátszó szigatúra-kötés esetén a szigatúra önmagában nem fordítható le, csak a struktúrával együtt: csak így állítható elő a struktúra tényleges, *látható* szigatúrája.
- Vagyis az összes olyan programrész, amely e struktúra látható szigatúrájára hivatkozik, *függ* e struktúra *megvalósításától!*
- Amíg az átlátszó szigatúra-kötés függőséget okoz, az áttetsző szigatúra-kötés kiküszöböli a függőséget.
- Ha egy struktúrához áttetsző módon kötjük a szigatúrát, a rá hivatkozó programrészek megbízhatnak a szigatúrában (a struktúra látható szigatúrája ui. ekvivalens az áttetsző szigatúrával).
- A megvalósítástól való függés gátolja, nehezíti a modularitást. A modularitás célja ui. az, hogy elszigetelje egymástól az egyes programrészeket, csökkentse az egyes programrészek hatását a többire. Ekkor egymástól függetlenül legyenek fejleszthetők, módosíthatók. Minél kevésbé függnek egymástól a modulok, annál könnyebben rakhatók össze a végén egyetlen rendszerré.

## MODULOK HIERARCHIKUS ÖSSZEKAPCSOLÁSA

### Polimorf szótár `string` típusú keresési kulccsal

- Az első változatban a *keresési kulcs* `string` típusú. A szignatúra és lehetséges megvalósítása:

```
signature MY_STRING_DICT =
sig
 type 'a dict
 val empty : 'a dict
 val insert : 'a dict * string * 'a -> 'a dict
 val lookup : 'a dict * string -> 'a option
end

structure MyStringDict :> MY_STRING_DICT =
struct
 datatype 'a dict = Empty
 | Node of 'a dict * string * 'a * 'a dict
 val empty = Empty
 fun insert (d, k, v) = ...
 fun lookup (d, k) = ...
end
```

- A hiányzó függvénydefiníciók a füzérek lexikografikus összehasonlító műveleteit használják.

## Modulok hierarchiája

- Egy nagy program architektúrája rendszerint nem lineáris, hanem faszerkezetű (hierarchikus). Az SML modulnyelv faszerkezetű modulrendszer leírását is lehetővé teszi.
  - A modulok egymásba skatulyázhatók; a beágyazott struktúrát *alstruktúrának* (substructure) nevezzük.
  - Egy struktúra más struktúra-deklarációkat tartalmazhat (akár átlátszó, akár áttetsző szignatúra-kötéssel).
  - Egy szignatúrában egy struktúra `structure strid : sigexp` alakban specifikálható (szignatúráról lévén szó, itt nincs különbség átlátszó és áttetsző kötés között).
  - Az alstruktúrákra a struktúrák típusellenőrzési és a kiértékelési szabályait rekurzív módon alkalmazza a fordítóprogram.
  - Ebben a részben arról lesz szó, hogyan lehet alstruktúrákkal kifejezni az egyes absztrakciók egymástól való függését.
- A következő példák egy polimorf szótárat megvalósító programból valók.

### Polimorf szótár `int` típusú keresési kulccsal

- A második változatban a *keresési kulcs* `int` típusú. A szignatúra és lehetséges megvalósítása:

```
signature MY_INT_DICT =
sig
 type 'a dict
 val empty : 'a dict
 val insert : 'a dict * int * 'a -> 'a dict
 val lookup : 'a dict * int -> 'a option
end

structure MyIntDict :> MY_INT_DICT =
struct
 datatype 'a dict = Empty
 | Node of 'a dict * int * 'a * 'a dict
 val empty = Empty
 fun insert (d, k, v) = ...
 fun lookup (d, k) = ...
end
```

- A hiányzó függvénydefiníciók az egészek aritmetikai összehasonlító műveleteit használják.

## Polimorf szótár *absztrakt* típusú keresési kulccsal

- A két változat, a típustól és az összehasonlító műveletektől eltekintve, azonos.
- A harmadik változatban a *keresési kulcs absztrakt* típusú. A *generikus szignatúra* és két leszármazottja (példánya, instanciája):

```
signature MY_GEN_DICT =
sig
 type key
 type 'a dict
 val empty : 'a dict
 val insert : 'a dict * key * 'a -> 'a dict
 val lookup : 'a dict * key -> 'a option
end

signature MY_STRING_DICT =
 MY_GEN_DICT where type key = string

signature MY_INT_DICT =
 MY_GEN_DICT where type key = int
```

## Polimorf szótár *int* típusú kulccsal, *oszthatóságon alapuló* összehasonlítással

```
structure MyIntDivDict :> MY_INT_DICT =
struct
 type key = int
 datatype 'a dict = Empty
 | Node of 'a dict * key * 'a * 'a dict
 fun divides (k, l) = (l mod k = 0)
 val empty = Empty
 fun insert (None, k, v) = Node (Empty, k, v, Empty)
 fun lookup (Empty, _) = NONE
 | lookup (Node (dl, l, v, dr), k) =
 if divides (k, l) then (* divisibility test *)
 lookup (dl, k)
 else if divides (l, k) then (* divisibility test *)
 lookup (dr, k)
 else
 SOME v
end
```

- Függetlenítsük a megvalósítást a keresési kulcs típusától és az összehasonlító műveletektől!

## Polimorf szótár *string* típusú keresési kulccsal (folyt.)

- A szignatúra egy megvalósítása *string* típusú kulcsokra:

```
structure MyStringDict :> MY_STRING_DICT =
struct
 type key = string
 datatype 'a dict = Empty
 | Node of 'a dict * key * 'a * 'a dict
 val empty = Empty
 fun insert (None, k, v) = Node (Empty, k, v, Empty)
 fun lookup (Empty, _) = NONE
 | lookup (Node (dl, l, v, dr), k) =
 if k < l then (* string comparison *)
 lookup (dl, k)
 else if k > l then (* string comparison *)
 lookup (dr, k)
 else
 SOME v
end
```

- A *MY\_INT\_DICT* szignatúrájú *MyIntDict* hasonlóan valósítható meg.

## Egy rendezett absztrakt típus és néhány megvalósítása

- A *t* típus és két összehasonlító művelet

```
signature ORDERED =
sig
 type t
 val lt : t * t -> bool
 val eq : t * t -> bool
end
```

- Egészek aritmetikai összehasonlítása

```
structure LessInt : ORDERED =
struct
 type t = int
 val lt = (op <)
 val eq = (op =)
end
```

- Ezekben a példákban indokolt az átlátszó szignatúra-kötés alkalmazása.

- Füzek lexikografikus összehasonlítása

```
structure LexString : ORDERED =
struct
 type t = string
 val lt = (op <)
 val eq = (op =)
end
```

- Egészek oszthatóságon alapuló összehasonlítása

```
structure DivInt : ORDERED =
struct
 type t = int
 fun lt (m, n) = (n mod m = 0)
 fun eq (m, n) = lt (m, n)
 andalso lt (n, m)
end
```

## Polimorf szótár generikus szignatúrája

- A DICT szignatúra „paramétere” az ORDERED szignatúrájú Key absztrakt keresési kulcs (a DICT szignatúra *örökli* a keresési kulcs ORDERED szignatúráját!):

```
signature DICT =
sig
 structure Key : ORDERED
 type 'a dict
 val empty : 'a dict
 val insert : 'a dict * Key.t * 'a -> 'a dict
 val lookup : 'a dict * Key.t -> 'a option
end
```

- A szignatúra két specializált változata segíti az absztrakciót:

```
signature STRING_DICT =
 DICT where type Key.t = string

signature INT_DICT =
 DICT where type Key.t = int
```

## Polimorf szótár: a specializált szignatúra megvalósítása int kulccsal (1. változat)

```
structure LessIntDict :> INT_DICT =
struct
 structure Key : ORDERED = LessInt
 datatype 'a dict = Empty
 | Node of 'a dict * Key.t * 'a * 'a dict
 val empty = Empty
 fun insert (None, k, v) = Node (Empty, k, v, Empty)
 fun lookup (Empty, _) = NONE
 | lookup (Node (dl, l, v, dr), k) =
 if Key.lt (k, l) then
 lookup (dl, k)
 else if Key.lt (l, k) then
 lookup (dr, k)
 else
 SOME v
end
```

## Polimorf szótár: a specializált szignatúra megvalósítása string kulccsal

```
structure StringDict :> STRING_DICT =
struct
 structure Key : ORDERED = LexString
 datatype 'a dict = Empty
 | Node of 'a dict * Key.t * 'a * 'a dict
 val empty = Empty
 fun insert (None, k, v) = Node (Empty, k, v, Empty)
 fun lookup (Empty, _) = NONE
 | lookup (Node (dl, l, v, dr), k) =
 if Key.lt (k, l) then
 lookup (dl, k)
 else if Key.lt (l, k) then
 lookup (dr, k)
 else
 SOME v
end
```

(Félkövér szedéssel e változat és a következő két változat közötti **különbséget** emeljük ki.)

## Polimorf szótár: a specializált szignatúra megvalósítása int kulccsal (2. változat)

```
structure DivIntDict :> INT_DICT =
struct
 structure Key : ORDERED = DivInt
 datatype 'a dict = Empty
 | Node of 'a dict * Key.t * 'a * 'a dict
 val empty = Empty
 fun insert (None, k, v) = Node (Empty, k, v, Empty)
 fun lookup (Empty, _) = NONE
 | lookup (Node (dl, l, v, dr), k) =
 if Key.lt (k, l) then
 lookup (dl, k)
 else if Key.lt (l, k) then
 lookup (dr, k)
 else
 SOME v
end
```

Később (a funktorok tárgyalásakor) látni fogjuk, hogyan írhatjuk meg e három struktúra közös generikus (azaz paraméterezhető) változatát.

## MODULOK SZIMMETRIKUS ÖSSZEKAPCSOLÁSA

Modulok szimmetrikus összekapcsolása MFP-51

### Példa: mértani alapelemek ábrázolása (VECTOR, POINT)

- A VECTOR szignatúra egy vektor skalárral való szorzatát (scale), két vektor összegét (add) és skalárszorzatát (dot), továbbá a vektorösszeadás egységelemét (zero) specifikálja.

```
signature VECTOR =
sig type vector
 val zero : vector
 val scale : real * vector -> vector
 val add : vector * vector -> vector
 val dot : vector * vector -> real
end
```

- A POINT szignatúra egy pont eltolását egy vektor mentén (translate) és egy végpontjaival megadott vektor előállítását (ray) specifikálja.

```
signature POINT =
sig structure Vector : VECTOR
 type point
 val translate : point * Vector.vector -> point
 val ray : point * point -> Vector.vector
end
```

## Típusmegosztás specifikálása

- Ebben a részben *modulok szimmetrikus összekapcsolásával* foglalkozunk.
- A különböző modulokban (akár azonos néven) specifikált absztrakt típusok mind különbözők. Általában ezt akarjuk. De nem mindig.
- A különböző modulokban specifikált típusok azonosságát az ún. *típusmegosztási előírással* (type sharing constraint) adhatjuk meg.
- A következő példák egy mértani elemeket megvalósító programból valók.
- Csupán két térbeli elemet valósítottunk meg: a pontot és gömböt.

```
signature GEOMETRY =
sig
 structure Point : POINT
 structure Sphere : SPHERE
end
```

- A mértani elemek ábrázolását a vektorra és a pontra alapozzuk.

Magasabbrendű funkcionális programozás. BME VIK, 2004. őszi félév

Modul, szignatúra, struktúra

Modulok szimmetrikus összekapcsolása MFP-52

### Példa: mértani alapelemek ábrázolása (SPHERE)

- A gömböt a középpontjával és a sugarával adjuk meg.
- A gömböt létrehozó függvényt (sphere) az alábbi szignatúra specifikálja:

```
signature SPHERE =
sig
 structure Vector : VECTOR
 structure Point : POINT
 type sphere
 val sphere : Point.point * Vector.vector -> sphere
end
```

- Emlékeztető: a típusneveket és az értéknveket különböző névterek tárolják, ezért a sphere azonosító egyszerűen használható típusnévként és értéknévként.
- Vegyük észre, hogy tér dimenziója nem része a specifikációnak!
- A dimenziót majd csak a modul megvalósításakor rögzítjük, ezzel elősegítjük a specifikáció *újrafelhasználását*.

## Különböző modulokban specifikált absztrakt típusok különböző volta

- Két- és háromdimenziós mértant így kezdődő struktúra-deklarációkkal valósíthatunk majd meg:
 

```
structure Geom2D :> GEOMETRY = ...
structure Geom3D :> GEOMETRY = ...
```
- Az *áttetsző* szignatúrákötésnek köszönhetően a két struktúrának *különböző* lesz a látható szignatúrája: a típusellenőrzés gondoskodik róla, hogy pl. a háromdimenziós térben ábrázolt `Geom3D.Sphere.sphere` középpontja ne lehessen a kétdimenziós térben ábrázolt `Geom2D.Point.point` pont.
- Ez jó dolog, növeli a programozás biztonságát.
- Sajnos, nemcsak `Geom2D` különbözik `Geom3D`-tól, hanem pl. `Geom2D.Sphere.Vector` is különbözik `Geom2D.Point.Vector`-tól!
- Ezért típushibát jelez a fordító a következő sor fordításakor (ahol `p` és `q` adott, `Geom2D.Point.point` típusú pontok):
 

```
Geom2D.Sphere.sphere (p, Geom2D.Point.ray (p, q))
```
- `Geom2D.Point.ray (p, q)` eredménye `Geom2D.Point.Vector.vector` típusú, `Geom2D.Sphere.sphere` ugyanakkor `Geom2D.Sphere.Vector.vector` típusú értéket vár. Ezt nyilvánvalóan nem akarjuk. Mi lehet az oka, hogyan küszöbölhetjük ki?

## Különböző modulokban specifikált absztrakt típusok megosztása (GEOMETRY)

- `GEOMETRY` módosított specifikációja (két változatban, a módosítást **félkövér szedés** jelöli):
 

```
signature GEOMETRY =
sig
 structure Point : POINT
 structure Sphere : SPHERE
 sharing type Point.point = Sphere.Point.point
 sharing type Point.Vector.vector = Sphere.Vector.vector
end

... sharing Point = Sphere.Point
 sharing Point.Vector = Sphere.Vector ...
```
- A megosztási előírás tehát garantálja, hogy
  - a típus egyenletek mindig teljesüljenek, amikor a `GEOMETRY` szignatúrárt és összes komponensét megvalósítjuk;
  - a megosztási előírás által érintett összes absztrakt típus azonos legyen.
- `VECTOR`-t és `POINT`-ot *egy példányban* valósítjuk meg, és e példányokat *újra felhasználjuk* a magasabb szintű absztrakció során (ld. a következő fóliákon).

## Különböző modulokban specifikált absztrakt típusok megosztása (SPHERE)

- Az ok az, hogy a szignatúrákban specifikáltuk azokat az alstruktúrákat, amelyekről e szignatúrák függnek, így a pont- és a vektor-absztrakciót *két-két példányban* hoztuk létre!
- Mivel áttetsző szignatúrákötést használunk, a látható szignatúráik mind különbözőek!
- *Általában ezt akarjuk, néha nem.* Az SML-ben előírhatjuk, hogy két alstruktúra valamely absztrakt típusa legyen azonos. Erre való a *típusmegosztási előírás* (type sharing constraint).
- `SPHERE` módosított specifikációja (a módosítást **félkövér szedés** jelöli):
 

```
signature SPHERE =
sig
 structure Vector : VECTOR
 structure Point : POINT
 sharing type Point.Vector.vector = Vector.vector
 type sphere
 val sphere : Point.point * Vector.vector -> sphere
end
```
- A *típusmegosztási előírás* egy változatával, a *struktúramegosztási előírással* (structure sharing constraint) előírhatjuk, hogy két alstruktúra *összes* absztrakt típusa azonos legyen.
 

```
... sharing Point.Vector = Vector ...
```

## Példa: VECTOR, POINT, SPHERE és GEOMETRY egy 3D-s megvalósítása

- ```
structure Vector3D : VECTOR = ...
```
- ```
structure Point3D : POINT =
struct
 structure Vector : VECTOR = Vector3D
 ...
end
```
- ```
structure Sphere3D : SPHERE =
struct
  structure Vector : VECTOR = Vector3D
  structure Point : POINT = Point3D
  ...
end
```
- ```
structure Geom3D :> GEOMETRY =
struct
 structure Point = Point3D
 structure Sphere = Sphere3D
end
```
- Fordítási idejű típushibához vezetne egyes 2D-s elemek alkalmazása a 3D-s megvalósításban. Példa:
 

```
... structure Sphere = Sphere2D ...
```

## A típusmegosztás elkerülése, a megosztási előírások számának csökkentése

- Fölvethető a kérdés, hogy a típusmegosztás elkerülhető-e a pont- és a vektor-absztrakció következtében létrejött példányszámok csökkentésével.
- A válasz: igen; azon az áron, hogy az egész programstruktúrát erőszakosan megváltoztatjuk.
- Első lépésként SPHERE-ben `Vector . vector`-t `Point . Vector . vector`-ra cseréljük:

```
signature SPHERE =
sig structure Point : POINT
 type sphere
 val sphere : Point.point * Point.Vector.vector -> sphere
end
```

- Ezzel GEOMETRY-ben `sharing Point . Vector = Sphere . Vector` feleslegessé vált, a megosztási előírások száma eggyel csökkent:

```
signature GEOMETRY =
sig structure Point : POINT
 structure Sphere : SPHERE
 sharing Point = Sphere.Point
end
```

## A típusmegosztás elkerülése, a megosztási előírások számának csökkentése (folyt.)

- Egyetlen lehetőség maradt, hogy megszabaduljunk a megosztási előírásoktól, az, hogy a GEOMETRY szignatúrából töröljük a `Point` alstruktúrát. Ez lehetséges éppen, csak nem megoldás, mert csupán elhalasztja a problémát, de nem oldja meg a következők miatt. Pl. egy mértani elemeket megvalósító igazi programban több olyan elem van, amely a pont-fogalomra épít. Ezeknek feltétlenül szükségük lesz a megosztási előírásra.
  - Lássunk egy további példát ennek alátámasztására, a `SEMI_SPACE` specifikációját. A `side` predikátummal vizsgálható meg, hogy *egy adott pont a tér melyik felében van* – feltéve, hogy ez lehetséges: ezért választjuk a `bool option` típusú eredményt.
- ```
signature SEMI_SPACE =
sig
  structure Point : POINT
  type semispace
  val side : Point.point * semispace -> bool option
end
```
- `SEMI_SPACE`-ből, `SPHERE`-hez hasonlóan, nem törölhetjük a `Point` alstruktúra specifikációját, ezért `Point`-ből mégiscsak két újabb példányt hozunk létre, azonosságukat pedig majd megosztási előírással kell kifejeznünk a `GEOMETRY` szignatúra új változatában.

A típusmegosztás elkerülése, a megosztási előírások számának csökkentése (folyt.)

- Ha a `Point` alstruktúra specifikációját is sikerülne feleslegessé tenni `SPHERE`-ben, egyáltalán nem kellene megosztási előírás. Ekkor ez maradna `SPHERE`-ből:

```
signature SPHERE =
sig
  type sphere
  val sphere : Point.point * Point.Vector.vector -> sphere
end
```

- Most `SPHERE`-ből hiányzik a `Point` specifikálása. Ha `Point` már definiálva van, akkor `SPHERE` lefordítható.
- Csakhogy ettől kezdve a `SPHERE` szignatúra a `Point` struktúráról, azaz a `POINT` szignatúra *egy megvalósításától* függ. Pl. a 2D-s megvalósítástól, ami által a szignatúra dimenziótól való függetlensége megszűnt, az absztrakció csorbát szenvedett.
- Ez az út tehát járhatatlan, de semmiképpen nem javasolható.
- Az eset hasonló ahhoz, amikor egy függvénynek nem paraméterként, hanem globálisként adunk át egy értéket.
- A `Point` struktúra a `SPHERE` szignatúra *paraméterének* tekinthető az ismertetett értelemben.

A típusmegosztás elkerülése, a megosztási előírások számának csökkentése (folyt.)

- A `Point` alstruktúrák azonosságát tehát megosztási előírással kell kifejeznünk `EXTD_GEOMETRY`-ben, `GEOMETRY` kiegészített, de a `Point` alstruktúra nélküli változatában:

```
signature EXTD_GEOMETRY =
sig
  structure Sphere : SPHERE
  structure SemiSpace : SEMI_SPACE
  sharing Sphere.Point = SemiSpace.Point
end
```

- Amiről itt szó van, nem más, mint a moduláris programozás alapvető belső ellentmondása.
 - Egyrészt el akarjuk *szigetelni* egymástól a modulokat, hogy egymástól függetlenül legyenek kezelhetők, és ne befolyásolja az egyik modul megváltoztatása a többit. (A globális értékektől, változóktól való függés is az elszigetelés ellen hat!)
 - Másrészt a modulok kombinálásával programokat hozunk létre; ekkor a különböző modulok egyes programelemeinek azonosságát (SML: megosztási előírásokkal) ki kell kötnünk.
- A megosztási előírás olyan *eszköz*, amely valaminek a bekövetkezése (ti. a specifikáció rögzítése) után hoz létre kapcsolatot a különböző absztrakciók között, és teremti meg az egész program koherenciáját. Ez a megközelítés az SML – más nyelvekben ismeretlen – sajátossága.

PARAMÉTEREZHETŐ MODULOK

Példa: polimorf szótár megvalósítása funktorral

- Egy korábbi példánk olyan polimorf szótár volt, ahol a keresési kulcsot és a rajta végrehajtható műveleteket egy *alstruktúra* specifikálta. A félkövér szedés a változatok közötti eltérésre utal.

```
structure StringDict :> DICT where type Key.t = string =
struct
  structure Key : ORDERED = LexString
  datatype 'a dict = Empty
                    | Node of 'a dict * Key.t * 'a * 'a dict
  val empty = Empty
  fun insert (None, k, v) = Node (Empty, k, v, Empty)
  fun lookup (Empty, _) = NONE
    | lookup (Node (dl, l, v, dr), k) =
      if Key.lt (k, l) then lookup (dl, k)
      else if Key.lt (l, k) then lookup (dr, k)
      else SOME v
end
```

- Látható, hogy különbség csak a keresési kulcs típusában és a rajta végrehajtható műveletekben van; mindezt az ORDERED szignatúra specifikálja.

Paraméterezhető, más néven generikus modulok

- Az újrafelhasználhatóságot segíti elő a *paraméterezhető*, más néven *generikus* modul, azáltal hogy a megvalósítás egy vagy több elemét specifikálatlanul hagyja. A specifikálatlan elemek specifikálása a modul egy *példányát* hozza létre. A közös részt *csak egyszer* kell megírni.
- Az SML-ben az ilyen generikus modult *funktornak* (functor) nevezik. A funktornak struktúra a paramétere is, az eredménye is. A funktor egy *példányát* úgy hozzuk létre, hogy alkalmazzuk egy (létező) struktúrára.
- A *funktordeklarációnak* (vagy *funktorkötésnek*) két változata van, az *átlátszó*:


```
functor funid (decs) : sigexp = strexp
```
- és az *áttetsző*:


```
functor funid (decs) :> sigexp = strexp
```
- A funktor típusának ellenőrzéséhez a fordító megvizsgálja, hogy a funktor törzse megfelel-e a szignatúra-kötés által előírt szignatúrának, feltéve hogy a funktor paramétereinek megfelelő a szignatúrája.
- Mint tudjuk, az *áttetsző* szignatúra-kötés a megadott szignatúrát eredményezi, az *átlátszó* szignatúra-kötés pedig ennek a törzsszignatúra szerinti típusokkal bővített változata.

Példa: polimorf szótár megvalósítása funktorral (DictFun)

- Az alstruktúrát, ha funktort deklarálunk, paraméterként adhatjuk át. A struktúradeklaráció és a funktordeklaráció közötti különbségeket most is félkövér szedéssel emeljük ki.

```
functor DictFun (structure K : ORDERED) :>
  DICT where type Key.t = K.t =
struct
  structure Key : ORDERED = K
  datatype 'a dict = Empty
                    | Node of 'a dict * Key.t * 'a * 'a dict
  val empty = Empty
  fun insert (None, k, v) = Node (Empty, k, v, Empty)
  fun lookup (Empty, _) = NONE
    | lookup (Node (dl, l, v, dr), k) =
      if Key.lt (k, l) then lookup (dl, k)
      else if Key.lt (l, k) then lookup (dr, k)
      else SOME v
end
```

- A DICT where type Key.t = K.t szignatúra az 'a dict típus absztrakt voltát megőrzi. A Key.lt összehasonlító műveletet a paraméterként átadott struktúra valósítja meg.
- A funktor structure K : ORDERED formális paraméterének specifikálása önmagában nem elég, a structure Key : ORDERED = K deklarációra is szükség van a funktor törzsében.

Funktoralkalmazás szignatúrája, funktor generativitása, ill. applikativitása

- A funktoralkalmazás *funid* (*binds*) alakú kifejezés, ahol *binds* a funktorargumentumok kötésének egy sorozata.
- Egy *funktoralkalmazás szignatúrája* a következő eljárással határozható meg. Feltesszük, hogy ismerjük a funktorparaméterek szignatúráját, valamint a funktor látható szignatúráját (a megadottat áttetsző, a bővítettet átlátszó szignatúrákötés esetén).
 - Minden argumentum szignatúráját illesztjük a funktor megfelelő paraméterének szignatúrájára. Ezzel minden argumentumra megkapjuk a paraméterszignatúrák egy bővített változatát.
 - Ha az eredmény szignatúrája hivatkozik a funktorparaméter valamely típuskomponensére, akkor a bővített paraméterszignatúrában lévő típusdefiniciónak meg kell jelennie az eredmény szignatúrájában.
- Az így előállított szignatúra átlátszó kötéssel kapcsolódik a funktoralkalmazáshoz. Ez azt jelenti, hogy ha a funktor eredményszignatúrája egy típust absztraktként specifikál, akkor e funktor minden alkalmazása e típusból egy új példányt hoz létre. Ezt a viselkedést a funktor *generativitásának* nevezzük. (Ezzel szemben a funktor *applikativitása* azt jelenti, hogy a funktor összes példánya megosztva „használja” ugyanazt az absztrakt típust.)

Funktorok és a típusmegosztás specifikálása egy példán

- Korábban specifikáltuk a GEOMETRY szignatúráját és komponenseit.
- Mivel a célunk többféle (2D és 3D) megvalósításuk, érdemes őket funktorként definiálnunk.

```

functor PointFun
  (structure V : VECTOR) : POINT = ...

functor SphereFun
  (structure V : VECTOR
   structure P : POINT) : SPHERE =
struct
  structure Vector = V
  structure Point = P
  ...
end

functor GeomFun
  (structure P : POINT
   structure S : SPHERE) : GEOMETRY =
struct
  structure Point = P
  structure Sphere = S
end

```

Példa: polimorf szótár (LtIntDict, LexStringDict, DivIntDict)

- A szótár három változatát a DictFun funktor alkalmazásával könnyű előállítani:


```

structure LtIntDict = DictFun (structure K = LessInt)
structure LexStringDict = DictFun (structure K = LexString)
structure DivIntDict = DictFun (structure K = DivInt)

```
- Idézzük föl LexString, LessInt és DivInt egy-egy megvalósítását:


```

structure LexString : ORDERED =
struct type t = string
  val lt = (op <)
  val eq = (op =)
end

structure LessInt : ORDERED =
struct type t = int
  val lt = (op <)
  val eq = (op =)
end

structure DivInt : ORDERED =
struct type t = int
  fun lt (m, n) = (n mod m = 0)
  fun eq (m, n) = lt (m, n) andalso lt (n, m)
end

```
- Például LessInt bővített szignatúrája ez: ORDERED where type t = int.
- Ha a K paraméter aktuális értéke LessInt, akkor K.t és int ekvivalensek lesznek, és így DictFun aktuális szignatúrája ez: DICT where type Key.t = int.

Funktorok és a típusmegosztás specifikálása egy példán (folyt.)

- Az előző funktordefiniciókkal a 2D-s programcsomag így valósítható meg:

```

structure Vector2D : VECTOR = ...

structure Point2D : POINT =
  PointFun (structure V = Vector2D)

structure Sphere2D : SPHERE =
  SphereFun (structure V = Vector2D and P = Point2D)

structure Geom2D : GEOMETRY =
  GeomFun (structure P = Point2D and S = Sphere2D)

```

Funktorok és a típusmegosztás specifikálása egy példán (folyt.)

- Egyetlen baj van csupán: SphereFun és GeomFun típushibás! A hiba javítható: típusmegosztást kell előírnunk.

```

functor SphereFun
  (structure V : VECTOR
   structure P : POINT
   sharing P.Vector = V) : SPHERE =
struct
  structure Vector = V
  structure Point = P
  ...
end

functor GeomFun
  (structure P : POINT
   structure S : SPHERE
   sharing P.Vector = S.Vector
   sharing P = S.Point) : GEOMETRY =
struct
  structure Point = P
  structure Sphere = S
end

```

A típusmegosztás elkerülése funktor használatakor (folyt.)

- Az EXTD_GEOMETRY szignatúrát ezzel a funktorral valósítjuk meg:

```

functor ExtdGeomFun
  (structure Sp : SPHERE
   structure Ss : SEMI_SPACE
   sharing Sp.Point = Ss.Point) =
struct
  structure Sphere = Sp
  structure SemiSpace = Ss
end

```

- Ahhoz, hogy a megosztási előírást elhagyhassuk a funktor paraméteréből, gondoskodnunk kell arról, hogy az EXTD_GEOMETRY szignatúra által előírt típusmegosztás teljesüljön.
- Megoldás lehet a POINT szignatúrát megvalósító struktúra „kiemelése”.
- Kétféle módon járhatunk el.

A típusmegosztás elkerülése funktor használatakor

- Most is felvetődik a kérdés: elkerülhető-e típusmegosztás?
- Igen, de azon az áron, hogy erőszakosan megváltoztatjuk a program szerkezetét.
- A típusmegosztás fő előnye, hogy közvetlenül és tömören fejezi ki az elvárt összefüggéseket, de a paraméterek szignatúrájának definiálásakor még nem kell velük foglalkozni. Ez a tulajdonság nagyon megkönnyíti az „előre gyártott” programrészek újrafelhasználását, hiszen ilyen esetekben a típusmegosztás konkrét igényét előre (azaz pl. a paraméterek definiálásakor) lehetetlen megmondani.
- Vegyük elő a már látott példát, amelyben a megosztási specifikációk számát egyre csökkentettük.

```

signature EXTD_GEOMETRY =
sig
  structure Sphere : SPHERE
  structure SemiSpace : SEMI_SPACE
  sharing Sphere.Point = SemiSpace.Point
end

```

A típusmegosztás elkerülése funktor használatakor (folyt.)

- Az első lehetőség az, hogy ExtdGeomFun paraméterként SPHERE és SEMI_SPACE egy-egy megvalósítása helyett a közös elem, azaz POINT egy megvalósítását kapja, és a funktor törzsében hozzá létre SPHERE és SEMI_SPACE egy-egy megvalósítását.
- Ehhez a SphereFun és a SemiSpaceFun funktorokat is megfelelően kell paraméterezni:

```

functor SphereFun
  (structure P : POINT) : SPHERE =
struct
  structure Vector = P.Vector
  structure Point = P
  ...
end

functor SemiSpaceFun
  (structure P : POINT) : SEMI_SPACE =
struct
  ...
end

```

A típusmegosztás elkerülése funktor használatakor (folyt.)

- Az ExtDGeomFun funktor első változatával, ExtDGeomFun_1-gyel több gond van:

```
functor ExtDGeomFun_1
  (structure P : POINT) : GEOMETRY =
struct
  structure Sphere = SphereFun (structure P = Point)
  structure SemiSpace = SemiSpaceFun (structure P = Point)
end
```

- ExtDGeomFun_1-ben alstruktúra-definícióban fordul elő SphereFun és SemiSpaceFun, és ez olyan paraméterekre korlátozza ExtDGeomFun_1-et, amelyek e két funktorral állíthatók elő. – Ez erős korlátozás ExtDGeomFun-hoz képest, amely SPHERE, ill. SEMI_SPACE bármely megvalósításának alkalmazását lehetővé teszi.
- ExtDGeomFun_1-nek paraméterként meg kell kapnia komponenseinek közös elemét, ill. elemeit (a példában a POINT szignatúrát megvalósító P struktúrát). Ez a megoldás kényelmetlenné válik, ha a programunk sok rétegből áll: a „legtávolabbi” elemtől kezdve a teljes hierarchiát fel építenünk minden alkalommal.
- Nincs igazi indok arra, hogy ExtDGeomFun_1 miért éppen POINT egy megvalósítását kapja paraméterként. (Nem elég nyomós) oka az, hogy ExtDGeomFun_1-nek fel kell építenie az említett hierarchiát a megosztási előírások kielégítéséhez.

A típusmegosztás elkerülése funktor használatakor (folyt.)

- ExtDGeomFun_2 rafináltabb változata ExtDGeomFun_3 és ExtDGeomFun_4. Mindkettőnek csak két paraméterre van szüksége azáltal, hogy a kettő közül valamelyiket bizonyos értelemben kiemeltük, és előírtuk, hogy a másiknak vele kompatibilisnek kell lennie.

```
functor ExtDGeomFun_3
  (structure Sp : SPHERE
   structure Ss : SEMI_SPACE where Point = Sp.Point) =
struct
  structure Sphere = Sp
  structure SemiSpace = Ss
end

functor ExtDGeomFun_4
  (structure Ss : SEMI_SPACE
   structure Sp : SPHERE where Point = Ss.Point) =
struct
  structure Sphere = Sp
  structure SemiSpace = Ss
end
```

A típusmegosztás elkerülése funktor használatakor (folyt.)

- A második lehetőség az, hogy a paraméterként átadott közös elem, azaz POINT megvalósításához kötjük SPHERE, ill. SEMI_SPACE (ugyancsak paraméterként átveendő) megvalósítását, és így érjük el a típusegyenletek teljesülését.
- ExtDGeomFun_2 alábbi deklarációja kielégíti a követelményeket, de láthatóan nincs semmi előnye a megosztási előírásokat tartalmazó kiinduló változathoz, ExtDGeomFun-hoz képest.

```
functor ExtDGeomFun_2
  (structure P : POINT
   structure Sp : SPHERE where Point = P
   structure Ss : SEMI_SPACE where Point = P) =
struct
  structure Sphere = Sp
  structure SemiSpace = Ss
end
```

- Inkább hátránynak tekinthető, hogy az eredeti változathoz képest egy harmadik paramétert vezettünk be, amelynek az egyetlen szerepe az, hogy elhagyhassuk a megosztási előírást.

A típusmegosztás elkerülése funktor használatakor (folyt.)

- E két utóbbi megoldásnak megvannak ugyanazok az előnyei, mint a megosztási előírást alkalmazó megoldásnak. De meg kellett törnünk a megoldás természetes szimmetriáját. Ez mondanivalónk lényege:
- A megosztási előírással a programozó *szimmetrikus helyzetet szimmetrikus módon* oldhat meg.
- A programozó helyett a fordítóprogram törli meg a szimmetriát, amikor ilyen vagy olyan megvalósítást választ. A programozó nem kényszerül arra, hogy önkényes, semmivel alá nem támasztható döntést hozzon.

A diák Robert Harper *Programming in Standard ML* c. jegyzete *Part III. The Module Language* c. részének felhasználásával készültek (ld. <<http://www-2.cs.cmu.edu/~rwh/smlbook>>).